

UNIVERSITE DE PARIS

Série A : 3391

N° d'ordre : 4263

THÈSES

présentées devant la Faculté des Sciences
de l'Université de Paris
pour obtenir le grade
de Docteur es Sciences naturelles

par

Jean AUROUZE

Licencié es Sciences
Diplômé d'Etudes Supérieures
Géologue principal de la F. O. M.

1ère thèse

HYDROGÉOLOGIE DU SUD DE MADAGASCAR

2ème thèse

Propositions données par la Faculté

Soutenues publiquement le 4 ^{Novembre} ~~Octobre~~ 1959
devant la Commission d'examen —

JURY

MM. L. BARRABE	Président
J. CUVILLIER)	Examineurs
P. BELLAIR)	

UNIVERSITE DE PARIS

Série :
N° d'ordre :

THÈSES

présentées devant la Faculté des Sciences
de l'Université de Paris
pour obtenir le grade
de Docteur es Sciences naturelles

par

Jean AUROUZE

Licencié es Sciences
Diplômé d'Etudes Supérieures
Géologue principal de la F. O. M.

1ère thèse

HYDROGÉOLOGIE DU SUD DE MADAGASCAR

2ème thèse

Propositions données par la Faculté

Soutenues publiquement le Octobre 1959
devant la Commission d'examen

JURY

MM. L. BARRABE	Président
J. CUVILLIER)	Examineurs
P. BELLAIR)	





Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547110_0005

FACULTE DES SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE PARIS

PROFESSEURS

Doyen M. PERES

MM.	JULIA.....	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.
	FOCH.....	T	Mécanique physique et expérimentale.
	de BROGLIE.....	T	Théories physiques.
	PRENANT.....	T	Anatomie et histologie comparées.
	PERES.....	T	Mécanique des fluides et applications.
	CURIE.....	T	Physique (S. P. C. N.).
	BARRABE.....	T	Géologie structurale et géologie appliquée.
	BOURCART.....	T	Géographie physique et géologie dynamique.
	PLANTEFOL.....	T	Botanique.
	GRASSE.....	T	Evolution des êtres organisés.
	PREVOST.....	T	Chimie organique.
	BOULIGAND.....	T	Application de l'analyse à la géométrie.
	CHAUDRON.....	T	Chimie appliquée.
	WYART.....	T	Minéralogie.
	TEISSIER.....	T	Zoologie.
	MANGENOT.....	T	Biologie végétale.
	AUGER.....	T	Physique quantique et relativité.
	MONNIER.....	T	Physiologie générale.
	PIVETEAU.....	T	Paléontologie.
	ROCARD.....	T	Physique (E. N. S.).
	CARTAN.....	T	Mathématiques (E. N. S.).
	LAFFITTE.....	T	Chimie générale.
	FAVARD.....	T	Géométrie supérieure.
	COULOMB.....	T	Physique du Globe.
Mlle	COUSIN.....	T	Biologie animale (S. P. C. N.).
MM.	CHRETIEN.....	T	Chimie minérale.
	DRACH.....	T	Zoologie.
	KASTLER.....	T	Physique (E. N. S.).
	EPHRUSSI.....	T	Génétique.
	WURMSER.....	T	Biologie physico-chimique.
	RIVIERE.....	T	Géologie (S. P. C. N.).
	GAUTHERET.....	T	Biologie végétale (P. C. B.).
	LUCAS.....	T	Recherches physiques.
	THOMAS.....	T	Biologie cellulaire.
	ARNULF.....	T	Optique appliquée.
	MORAND.....	T	Enseignement de Physique.

M.	SOLEILLET.....	T	Physique.
	FORTIER.....	T	Mécanique expérimentale des fluides.
	DANJON.....	T	Astronomie.
	LAPORTE.....	T	Physique générale et Radioactivité.
	JANET.....	T	Mécanique analytique et Mécanique céleste.
	PETIT.....	T	Biologie maritime.
	QUENEY.....	T	Météorologie et dynamique atmosphérique.
	GALLIEN.....	T	Embryologie.
	EICHHORN.....	T	Biologie végétale (S. P. C. N.).
	de CUGNAC.....	T	Biologie végétale (S. P. C. N.).
le	CAUCHOIS.....	T	Chimie Physique.
M.	THELLIER.....	T	Physique du Globe.
	L'HERITIER.....	T	Génétique.
	GRIVET.....	T	Radioélectricité.
	PONCIN.....	T	Mécanique générale.
	DUBREIL.....	T	Arithmétique et théorie des nombres.
	QUELET.....	T	Chimie organique.
	CAGNIARD.....	T	Géophysique appliquée.
	CHAMPETIER...	T	Chimie macromoléculaire.
	CUVILLIER.....	T	Géologie structurale et Géologie appliquée.
	JUNG.....	T	Pétrographie.
	TRILLAT.....	T	Microscopie et diffraction électronique.
	WIEMANN.....	T	Chimie organique et structurale.
	JACQUINOT.....	T	Spectroscopie et physique céleste.
	VASSY.....	T	Physique de l'atmosphère.
	DESTOUCHES....	T	Théories physiques.
	PRUVOST.....	T	Géologie.
	AMIEL.....	T	Chimie générale (P. C. B.).
	HOCART.....	T	Minéralogie.
	MATHIEU.....	T	Physique (P. C. B.).
	COUTEAUX.....	T	Biologie animale (P. C. B.).
	MAY.....	T	Biologie animale (P. C. B.).
	CHOQUET.....	T	Calcul différentiel et intégral.
	FELDMANN.....	T	Biologie (P. C. B.).
	GUINIER.....	T	Physique des solides.
	JOST.....	T	Physiologie comparée.
	FORTET.....	T	Calcul des probabilités.
	SCHWARTZ.....	T	Calcul différentiel et intégral.
	CHOUARD.....	T	Physiologie végétale.
	MALAVARD.....	T	Aviation.
	BRELOT.....	T	Calcul différentiel.
	NORMANT.....	T	Chimie organique.
	BENARD.....	T	Chimie minérale.

MM.	BUVAT	T	Botanique (E. N. S.).
	DUGUE	T	Statistiques mathématiques.
	GELOSO	T	Chimie (S. P. C. N.).
	SOULAIRAC	T	Psychophysiologie.
	ULRICH	T	Physiologie végétale.
	MARECHAL	T	Optique théorique et appliquée.
	KIRRMANN	T	Théories chimiques.
	CHADEFAUD	T	Botanique.
	DESTRIAU	T	Physique (M. P. C.).
Mlle	Le BRETON	T	Physiologie générale.
MM.	SALEM	T	Mathématiques générales.
	LELONG	T	Mathématiques générales.
	DEVILLERS		Anatomie et histologie comparées.
	EHRESMANN ...	T	Topologie algébrique.
	FRANCON	T	Physique (S. P. C. N.).
	GLANGEAUD ...	T	Géographie physique et Géologie dynamique.
	GODEMENT	T	Mathématiques (M. P. C.).
	PISOT	T	Calcul des Probabilités.
	ROCH	T	Géologie.
	SCHATZMANN ..		Astrophysique.
	TERMIER	T	Paléontologie stratigraphique.
	ZAMANSKY	T	Mathématiques générales.
	LENNUIER		Physique (M. G. P.).
	RIZET		Génétique.
	ROUTHIER		Géologie appliquée.
Mme	TONNELAT	T	Théories physiques.
MM.	DIXMIER	T	Mathématiques (M. P. C.).
	SOUCHAY	T	Chimie générale.
	AIGRAIN	T	Electrotechnique.
	BRUSSET		Chimie minérale.
	LEVY		Physique théorique.
Mme	CHAIX		Chimie biologique.
Mme	HUREL-PY		Biologie végétale (P. C. B.).
MM.	PIAUX		Chimie (P. C. B.).
	BRUN		Mécanique expérimentale des fluides.
	LEDERER	T	Chimie des substances organiques naturelle
Mme	DUBREIL	T	Mathématiques.
Mme	LELONG	T	Mathématiques (E. N. S.).
MM.	BELLAIR	T	Géologie (S. P. C. N.).
	COTTE	T	Physique (M. P. C.).
	DUBOIS	T	Chimie (S. P. C. N.).
	LAMOTTE		Zoologie (E. N. S.).
	Le ROLLAND		Mécanique des fluides.

MM.	MICHEL	T	Chimie (S. P. C. N.).
	OLMER	T	Energétique générale.
	ROUAULT	T	Physique générale.
	GAUTHIER	T	Mécanique appliquée.
	BARCHEWITZ ...		Chimie physique.
	BROSSEL		Physique atomique.
	BUSER		Biologie animale, (P. C. B.).
	CAMUS		Biologie végétale (P. C. B.).
	CASTAING		Physique générale.
	CURIEN		Minéralogie et cristallographie.
	MOYSE		Physiologie végétale.
	NOIROT		Evolution des êtres organisés.
	PANNETIER		Chimie (S. P. C. N.).
	POSSOMPES		Biologie animale (P. C. B.).
	PULLMANN		Chimie théorique.
	TEILLAC		Physique nucléaire et radioactivité.
	TONNELAT		Biologie physico-chimique.
	VILLE		Econométrie.
	WILLEMART		Chimie (P. C. B.).
	DODE	T	Chimie
	FREYMANN	T	Physique (S. P. C. N.).
	GUINOCHET	T	Biologie végétale (Orsay).
	ROLLET	T	Chimie (P. C. B.).
Mlle	JOSIEN	T	Chimie (P. C. B.).
MM.	CHEVALLEY	T	Géométrie algébrique et théorie des groupes.
	ARNOULT	T	Physique (Orsay).
	CHAPELLE	T	Physique (P. C. B.).
	DELANGE	T	Mathématiques (Orsay).
	DENY	T	Mathématiques (Orsay).
	GERMAIN	T	Mécanique des fluides.
	LUCAS	T	Géologie.

Secrétaire Général M. MONIER.

SOMMAIRE

ERRATA

Page	ligne	au lieu de	lire
II	(p.82)	les nappes du Karroo	les nappes du Karroo
V	(p.178)	Problèmes majeures	Problèmes majeurs
4	2	tertiaire	tertiaires
5	7 en rem.	les cultures :	les cultures,
9	12	et a toujours un but	et a toujours, un but
21	3 en rem.	au Nord et à l'Est	au Nord et l'Est
26	24	cote d'érosion	côte d'érosion
30	12 en r.	de la coupe	de la base de la coupe
39	17	:signal Vasianisy	: au signal Vasianisy
39	7 en r.	Lovkarivo	Lovokarivo
40	2 en r.	qui ne peut ne correspondre	qui peut ne correspondre
54	17	la plus épaisse	le plus épais
57	2	Antsasampa	Antjasampa
57	4	Des calcaires	Des carapaces calcaires
72	10	"piège lithologique"	"piège lithologique"
76	3	capacité de rétention	capacité de libre écou- lement
86	17 en r.	Andrambo	Andremba
94	15	qui s'acoulent	qui s'écoulent
94	5 en r.	DHT à 10°	DHT 7° à 10°
95	18 en r.	Néogènes	néogènes
95	7 en r.	Néogènes	néogènes
100	5	fastidieux	fastidieux
103	2	possitive	positive
106	5 en r.	Fatsiholobe	Fatiholobe
113	14	délimitées	à délimiter
114	13 en r.	celles des vents	celle des vents
127	1 en r.	capacité de rétention	capacité de libre écou- lement
128	9 en r.	nouveau	nouveau
138	14	un puits, presque à	un puits presque à
146	2 en r.	trop d'autre	trop d'autres
154	2 en r.	teneur	erreur
Planche IX		couches isopiéométriques	courbes isopiéométriques
Planche XII		Berantany	Berantany

MM.	MICHEL	T	Chimie (S. P. C. N.).
	OLMER	T	Energétique générale.
	ROUAULT	T	Physique générale.
	GAUTHIER	T	Mécanique appliquée.
	BARCHEWITZ ...		Chimie physique.
	BROSSEL		Physique atomique.
	BUSER		Biologie animale, (P. C. B.).
	CAMUS		Biologie végétale (P. C. B.).
	CASTAING		Physique générale.
	CURIEN		Minéralogie et cristallographie.
	MOYSE		Physiologie végétale.
	NOIROT		Evolution des êtres organisés.
	PANNETIER		Chimie (S. P. C. N.).
	POSSOMPES		Biologie animale (P. C. B.).
	PULLMANN		Chimie théorique.
	TEILLAC		Physique nucléaire et radioactivité.
	TONNELAT		Biologie physico-chimique.
	VILLE		Econométrie.
	WILLEMART		Chimie (P. C. B.).
	DODE	T	Chimie
	FREYMANN	T	Physique (S. P. C. N.).
	GUINOCHET	T	Biologie végétale (Orsay).
	ROLLET	T	Chimie (P. C. B.).
Mlle	JOSIEN	T	Chimie (P. C. B.).
MM.	CHEVALLEY	T	Géométrie algébrique et théorie des groupes.
	ARNOULT	T	Physique (Orsay).
	CHAPELLE	T	Physique (P. C. B.).
	DELANGE	T	Mathématiques (Orsay).
	DENY	T	Mathématiques (Orsay).
	GERMAIN	T	Mécanique des fluides.
	LUCAS	T	Géologie.

Secrétaire Général M. MONIER.

ERRATA

Page	ligne	au lieu de	lire
II	(p.82)	les nappe du Karroo	les nappes du Karroo
V	(p.178)	Problèmes majeures	Problèmes majeurs
4	2	tertiaire	tertiaires
5	7 en rem.	les cultures :	les cultures,
9	12	et a toujours un but	et a toujours, un but
21	3 en rem.	au Nord et à l'Est	au Nord et l'Est
26	24	cote d'érosion	côte d'érosion
30	12 en r.	de la coupe	de la base de la coupe
39	17	:signal Vasianisy	: au signal Vasianisy
39	7 en r.	Lovkarivo	Lovokarivo
40	2 en r.	qui ne peut ne correspondre	qui peut ne correspondre
54	17	la plus épaisse	le plus épais
57	2	Antsasampa	Antjasampa
57	4	Des calcaires	Des carapaces calcaires
72	10	"piège litholigique"	"piège lithologique"
76	3	capacité de rétention	capacité de libre écou- lement
86	17 en r.	Andrambo	Andremba
94	15	qui s'acoulent	qui s'écoulent
94	5 en r.	DHT à 10°	DHT 7° à 10°
95	18 en r.	Néogènes	néogènes
95	7 en r.	Néogènes	néogènes
100	5	fastidieux	fastidieux
103	2	positive	positive
106	5 en r.	Fatsiholobe	Fatiholobe
113	14	délimitées	à délimiter
114	13 en r.	celles des vents	celle des vents
127	1 en r.	capacité de rétention	capacité de libre écou- lement
128	9 en r.	nouveau	nouveau
138	14	un puits, presque à	un puits presque à
146	2 en r.	trop d'autre	trop d'autres
154	2 en r.	teneur	erreur
Planche IX		couches isopiéziométriques	courbes isopiéziométriques
Planche XII		Berantany	Beranantany

SOMMAIRE

	Page
AVANT-PROPOS	
INTRODUCTION	3
Caractères généraux	3
Historique	7
But, principes et plan du mémoire	9
GEOLOGIE	11
INTRODUCTION	11
SOCLE CRISTALLIN	14
Précambrien	14
Formations volcaniques	16
Carte structurale	17
SEDIMENTAIRE ANTE-SENONIEN	20
Karoo	20
Jurassique	21
Crétacé infra-basaltique	21
Extension du sédimentaire anté-senonien	22
SEDIMENTAIRE MARIN SENONIEN ET TERTIAIRE	23
Senonien supérieur	23
Eocène inférieur	24
Eocène à Alvéolines	24
Eocène à Huîtres	24
Morphologie du plateau calcaire	25
Tectonique du plateau calcaire	27
Coupes géologiques	28
Oligocène et Miocène	31
Extension du sédimentaire senonien et tertiaire	34
NEOGENE CONTINENTAL	35
Cuvette d'Ankazomanga	35
Couloir d'Itombona	36
Région d'Andranoabo	37
Région Sud-Ouest d'Ampanihy	38
Bassin de Beloha	39
Bassin d'Ambovombe	43
Conclusions pour le Néogène continental	46

	Page
QUATERNAIRE	47
Coupes caractéristiques	48
Formations marines et littorales	50
Formations dunaires	50
Formations lacustres et de piedmont	53
Alluvions	55
Formations superficielles	56
HYDROGEOLOGIE	59
CONDITIONS D'EXISTENCE DES NAPPES	60
CONDITIONS CLIMATIQUES	60
Pluviométrie	60
Evaporation et transpiration	62
Discussion	63
Tentative d'explication	65
Conclusions sur l'alimentation des nappes	68
CONDITIONS GEOLOGIQUES	68
Réservoirs aquifères	69
Niveaux imperméables	71
Pièges aquifères	72
SYSTEMES AQUIFERES	75
I- LES NAPPES LOCALES	75
NAPPES SUSPENDUES DANS LE SOCLE	75
Nappe de Tsimandaha, à Antanimora	75
Massif volcanique de l'Androy	76
NAPPES DANS LE KARROO	76
Ambatomainty	77
Nappes profondes dans l'Isalo	78
Nappes phréatiques dans l'Isalo	79
Nappe de Betioky	80
Recherches et améliorations possibles pour les nappes du Karoo	82
NAPPES DANS LE JURASSIQUE ET LE CRETACE INFRA-BASALTIQUE.....	83
Sources dans le Jurassique	83
Crétacé	84
Sous-écoulement de la Menarandroy	84
Recherches possibles	84
NAPPES DANS LE SENONNIEN ET L'EOCENE INFÉRIEUR	85
Points d'eau	85
Recherches possibles	85
NAPPES DANS L'EOCENE A ALVEOLINES	86
Région Nord	86
Région Sud	87
Recherches possibles	88
NAPPES DANS L'EOCENE A HUITRES	88
Nappe de Beomby-Lovo	88
Autres points d'eau	92

	Page
NAPPE D'ANKAZOMANGA	93
Points d'eau	93
Surface piézométrique	94
Qualité de l'eau	94
Débits	94
Alimentation de la nappe	95
Extension de la nappe	96
Recherches possibles	96
COULOIR D'ITOMBONA ET REGION D'ANDRANOABO	97
Couloir d'Itombona	97
Plateau de Vohitsara	97
Région d'Andranoabo-Sainta	97
Conclusion pour le Néogène dans cette région	98
NAPPES TEMPORAIRES DE LA REGION D'AMPANIHY	99
Nord-Ouest d'Ampanihy	99
Sud-Ouest d'Ampanihy	99
NAPPE PHREATIQUE DE BELOHA	99
Continuité de la nappe	100
Surface piézométrique	101
Qualité de l'eau	102
Débits	103
Alimentation de la nappe	104
Extension et recherches possibles	105
AUTRES NAPPES DANS LES SABLES BLANCS DU BASSIN DE BELOHA	106
Kirimosa	106
Région Nord-Ouest de Beloha	107
Région Ouest de Beloha	107
Anjandava	107
Région Sud-Est de Beloha	107
Région Sud de Tsihombe	108
Ampengoka	108
Conclusions pour les nappes dans les sables blancs.....	108
NAPPES SUSPENDUES D'IMONGY, TSIANOHA, IHODO	108
Nappe d'Imongy	109
Nappe de Tsianooga	109
Nappe de Ihodo	110
NAPPES DU PLATEAU D'AMBONDRO	111
Points d'eau	111
Permanence des points d'eau	112
Qualité de l'eau	112
Débits	112
Nappe ou nappes ?.....	113
Alimentation des nappes	115
Perspectives d'améliorations pratiques	115

	Page
AUTRES NAPPES SUSPENDUES DU BASSIN D'AMBOVOMBE.....	116
NAPPE D'AMBOVOMBE	117
Géologie	118
Gisement et forme de la nappe	120
Débits	123
Qualité des eaux	125
Alimentation de la nappe	127
Exploitation de la nappe et recherches nécessaires	128
NAPPE PROFONDE D'ANKITRY	129
EAUX THERMALES	130
II - LA NAPPE GENERALE	133
DEFINITION	133
CARACTERES GENERAUX	134
Surface piézométrique	134
Alimentation de la nappe générale	135
Extension	136
NAPPE GENERALE DANS LE SOCLE CRISTALLIN	137
Zone d'affleurement du socle	137
Points d'eau	137
Forme et variations de la nappe	138
Débits	139
Qualité des eaux	139
Etude de détail à Ampanihy	141
Région d'Andranabo	143
Région Sud-Ouest d'Ampanihy	143
Bassin de Beloha	144
Plateau de Lovokarefo	144
Région au Nord de Beloha	145
Région de Tsimilofo	145
Autres régions	146
Bassin d'Ambovombe	146
Massif volcanique de l'Androy	148
Conclusions	148
NAPPE GENERALE DANS LE NEOGENE CONTINENTAL	148
Bassin d'Ampanihy	149
Points d'eau et sondage du Sud du bassin.....	149
Dépression d'Itrobeka	149
Bassin de Beloha	150
Points d'eau	150
Sondages	151
Conclusions	151
Bassin d'Ambovombe	152
Région d'Andrananivo	152
Région d'Erada-Laparoy	152
Région d'Ambaliandro	153

	Page
Ambatolahy-Ankatrafay	154
Conclusions	155
NAPPE GENERALE DANS L'Eocene	155
Sources	156
Avens	158
Puits	158
Conclusions	159
NAPPE GENERALE DANS LE QUATERNAIRE	159
Types de points d'eau	160
Région comprise entre Soalara et Tsivaha	162
Région de Lavanono	163
Région comprise entre le Cap Sainte Marie et le Mandrare	166
Sondages d'Ankitry et Ferme Ambovombe	167
NAPPES ALLUVIALES DES FLEUVES	168
Onilahy	168
Linta	169
Menarandra	170
Manambovo	171
Mandrare	171
CONCLUSIONS	173
Essai de classification des nappes	174
Données et hypothèses nouvelles	176
Problèmes majeures à étudier	178
Méthode et techniques de travail	180
BIBLIOGRAPHIE	183

ILLUSTRATIONS

- I - Carte de situation.
- II^a - Régions naturelles.
- II - Carte structurale du socle cristallin.
- III^a - Coupes géologiques n° 1 à 6.
- III^b - Coupes géologiques n° 7 à 12.
- IV - Carte géologique schématique.
- V - Coupes de sondages caractéristiques.
- VI - Isohyètes annuelles - Evapotranspiration potentielle.
- VII - Diagrammes pluviométriques.
- VIII - Nappe générale.

- IX - Nappe du socle à Ampanihy.
- X - Profils en long des fleuves.
- XI - Nappe de Betioky.
- XII - Nappe de Beomby-Lovo.
- XIII - Nappe d'Ankazomanga.
- XIV - Nappe de Beloha.
- XV - Carte des points d'eau de la région d'Ambondro.
- XVI - Nappe d'Ambovombe.
- XVII - Courbes des débits en fonction des rabattements.

AVANT-PROPOS

L'examen des origines et de la genèse de ce mémoire, pour reprendre des termes usuels en géologie, fait apparaître l'intervention, à des titres divers, plus ou moins lointains, de tous ceux à qui je veux exprimer ici mes remerciements.

Tout d'abord, aux Maîtres de l'Université de Paris, qui m'ont appris à interpréter loyalement les faits objectivement observés et dont l'enseignement, donnant accès aux problèmes divers mais connexes de la géologie, m'a évité toute spécialisation prématurée (puisque, quelques années plus tôt, cette thèse eût pu porter sur des terrains cristallins de Madagascar ou sur des structures pétrolières de Lorraine) ; que tous trouvent ici l'expression de ma gratitude et, plus spécialement, M. L. LUTAUD, titulaire en 1946 de la chaire de Géographie Physique et Géologie Dynamique, dont les cours m'ont décidé à choisir la profession de géologue, et M. L. BARRABE, Directeur du Laboratoire de Géologie Structurale et Géologie Appliquée, qui, après m'avoir appris, en 1947-1949, les relations entre la Géologie et ses applications, a bien voulu accepter de diriger la rédaction de ce mémoire.

Dès ma seconde arrivée à Madagascar, en 1955, j'ai eu à mettre à profit les leçons d'Hydrogéologie de M. J. CUVILLIER, Professeur à la Sorbonne, car M. H. BESAIRIE, faisant état de l'analogie entre les études pétrolières, que je venais d'effectuer, et les recherches d'eau, m'a chargé d'accompagner dans sa première mission M. J. ARCHAMBAULT. C'est donc avec lui que les travaux exposés dans ce mémoire ont débuté pour moi et à partir de ses hypothèses que bien des problèmes ont été examinés sous un jour nouveau ; celui qui fut son acolyte et reste son obligé lui adresse toute sa reconnaissance.

Sans M. H. BESAIRIE, Membre correspondant de l'Institut, Géologue en Chef de Classe Exceptionnelle, Chef du Service Géologique de Madagascar et promoteur de la Géologie malgache, qui a su utiliser au mieux mes capacités, et même mes défauts, au cours de mes deux séjours à Madagascar, ce mémoire n'aurait certainement pas vu le jour. Après avoir lui-même réuni une grande partie des matériaux utilisés dans ce travail, il m'a chargé de les compléter et m'a confié la coordination des recherches hydrogéologiques dans le Sud et l'Ouest de l'Ile. De plus, il a eu un avis déterminant dans les facilités qui m'ont été accordées pour mener à bien cette thèse et a bien voulu se charger en outre de tout le travail matériel de présentation du mémoire. Pour tout, je tiens à exprimer ici à M. H. BESAIRIE l'expression de ma très respectueuse gratitude et de mon entier dévouement.

Pendant trois années, j'ai utilisé largement les travaux de mes devanciers, à qui je demande de bien vouloir m'excuser en cas d'oubli involontaire dans le texte ou la bibliographie, et l'aide de nombreux collaborateurs : aides-géologues, prospecteurs, topographes, dessinateurs, interprètes, parmi lesquels je remercie spécialement MM. J. RANDRIANARIVONY, pour ses prospections et levés topographiques, G. RAZAFIMAHEFA, pour la conscience avec laquelle il a effectué les mesures de débits, et P. RAHARISON, qui m'a fidèlement suivi dans mes tournées comme interprète, topographe et prospecteur.

La rédaction du mémoire, au cours d'un congé en France, n'eût pu être achevée sans l'attribution d'une prolongation de deux mois, et je remercie bien vivement M. A. OBERMULLER, Géologue en Chef, pour l'appui qu'il m'a accordé à ce sujet, ainsi que pour les facilités matérielles qu'il m'a offertes.

En ce qui concerne la présentation matérielle de ce travail, je dois tous mes remerciements aux membres du personnel du Service Géologique de Madagascar, auxquels mon manuscrit a occasionné un surcroît de travail, mais qui, conformément aux traditions du Service, ont effectué la mise au net avec le maximum de rapidité et d'efficacité.

Enfin, la soutenance de cette thèse n'aurait pu avoir lieu sans difficultés si M. le Ministre des Mines et de l'Energie de la République Malgache, après m'avoir autorisé à faire état de mes informations sur l'Hydrogéologie du Sud, ne m'avait accordé une seconde prolongation de séjour en France. Je l'en remercie ici très respectueusement et ose espérer que cette étude, parachevée grâce à lui, pourra contribuer au développement d'une partie de la Grande Ile.

Paris, Décembre 1958 - Juin 1959

INTRODUCTION

La zone étudiée est figurée planche I^a ; elle s'étend le long des côtes Sud et Sud-Ouest de Madagascar sur plus de 450 kilomètres, du fleuve Mandrara au Sud-Est, soixante kilomètres à l'Ouest de Fort-Dauphin, au fleuve Onilahy au Nord-Ouest, 25 kilomètres au Sud de Tuléar, sur une profondeur variant entre 70 et 90 kilomètres ; sa superficie est voisine de 30.000 kilomètres carrés.

Cette région comprend une partie du pays Antandroy (ou Androy), entre le Mandrara et la Menarandra et la majeure partie du pays Mahafaly, entre la Menarandra et l'Onilahy. Politiquement, elle fait partie de la Province de Tuléar, avec une partie des Districts d'Amboasary, Ambovombe, Bekily, Ampanihy, Betioky et Tuléar.

CARACTERES GENERAUX

Climat.— La caractéristique dominante de cette région réside dans son climat : nettement aride le long de la côte Sud-Ouest avec en moyenne moins de 300 millimètres de pluies par an pour une évapotranspiration annuelle théorique de l'ordre de 1200 à 1300 mm, semi-aride dans le reste de la zone avec une moyenne annuelle des pluies inférieure à 650 mm pour une évapotranspiration atteignant 1400 mm par an, ce climat, bien que moins chaud et moins sec en raison de la proximité de la mer et de la prédominance des vents du Sud-Est, a pu être comparé (ARCHAMBAULT, 1956) à celui des régions présahariennes de l'Afrique. L'indice d'aridité, calculé selon DE MARTONNE, est compris entre 4 et 10.

Géologie.— Du point de vue géologique, cette région est constituée par des formations sédimentaires, en majorité tertiaire, reposant sur un socle cristallin précambrien ; celui-ci affleure en bordure interne de la zone considérée avec deux "caps" vers le Sud séparant des bassins sédimentaires à caractères géologiques et hydrogéologiques un peu différents. Le bassin d'Ambovombe, à l'Est de l'éperon cristallin de Tsihombe, comporte principalement des sédiments continentaux néogènes et quaternaires ; celui de Beloha, entre les fleuves Manambovo et Menarandra, également continental en majeure partie, comprend au Sud des formations marines éocènes plus ou moins masquées. L'Eocène marin prend une grande extension dans le plateau Mahafaly, entre la Menarandra et l'Onilahy, les sédiments continentaux plus récents étant limités aux régions d'Ampanihy et d'Andranoabo à l'Est du plateau et à la zone côtière dunaire à l'Ouest. Dans la région de Betioky, la série stratigraphique est plus complète (du Jurassique moyen à l'Eocène) et repose sur les formations continentales du Karroo, le socle précambrien étant beaucoup plus profond.

Morphologie.— La majeure partie de l'Androy sédimentaire, à l'Est de la Menarandra, a les caractères d'une pénéplaine ou, plus exactement, d'un plateau incliné vers la mer de 250 à 300 mètres d'altitude en bordure des affleurements précambriens, eux-mêmes pénéplanés, à 100-150 m vers la côte où un rebord dunaire important s'élève à 200-250 m (maximum 371 m à l'Andranogoa, à l'Ouest du Mandrare) ; en bord de mer une falaise plus ou moins vive, taillée dans les dunes anciennes, atteint près de 200 mètres d'altitude au Cap Sainte Marie.

Un fait important est l'existence de vastes bassins endoréiques limités au Sud par le rebord dunaire ; à l'Est le bassin fermé d'Ampamolora occupe une surface voisine de 2.500 kilomètres carrés, avec au Nord le bassin de l'Antanimora, au Sud-Ouest celui des lacs salés d'Ihodo ; à l'Ouest le bassin fermé de Beloha occupe la majeure partie du plateau Karimbola. Il existe d'autre part, aussi bien dans ces bassins qu'en dehors, une multitude de cuvettes fermées, de toutes dimensions, d'une part dans les zones tabulaires, d'autre part dans les régions dunaires ; les premières posent, quant à leur origine, des problèmes importants.

Au Nord de la Menarandra, l'unité morphologique majeure est le plateau calcaire Mahafaly ; presque rigoureusement tabulaire, avec de multiples petites dépressions fermées, doucement incliné vers la mer de 350 à 400 mètres d'altitude à l'Est à une centaine de mètres à l'Ouest, il s'agit d'un véritable karst, limité à l'Est par une côte d'érosion, à l'Ouest par une falaise quasi-rectiligne contre laquelle s'appuient les formations dunaires de la zone littorale. Ce plateau est inégalement morcelé au Sud par le réseau hydrographique fossile de la Linta et coupé d'Est en Ouest, au Nord, par le couloir d'Itombona, d'origine mal élucidée. A l'intérieur du plateau, on peut

distinguer aussi les importantes dépressions d'Ankazomanga et d'Ilempo et, à l'Ouest, une zone allongée Nord-Sud et large de 10 à 15 kilomètres, dite "Zone des avens", limitée à l'Est par une côte à regard Ouest.

Diverses caractéristiques locales de morphologie, sol, ou simplement paysage permettent de distinguer un certain nombre de sous-régions dont l'énumération et la description n'ont pas leur place ici mais qui, en raison de leur valeur de repères, figurent sur la carte de la planche Ib.

Végétation.— La végétation du Sud de Madagascar présente, même pour un profane, des caractères très particuliers tenant à la fois au climat et à l'insularité. En se bornant aux principaux types de paysages végétaux naturels on peut distinguer : un bush mésophile, prédominant, caractérisé par le "Fantsiliotsy" (nom vernaculaire du genre Alluaudia) et de petits arbres à feuilles caduques, un bush xérophile, un peu différent suivant qu'il croît sur un terrain calcaire ou sur le socle cristallophyllien, avec une grande abondance d'Euphorbes épineuses, des galeries ou îlots forestiers à Tamariniers (kily) le long des grands fleuves et dans les zones à sol humide, diverses formations de dunes et des îlots de végétation halophile sur les sols salés. Seules sont entièrement dénuées de toute végétation les dunes vives, particulièrement étendues dans la zone côtière entre Linta et Menarandra.

La dégradation, le plus souvent par le feu, de la végétation naturelle conduit, suivant les régions et le stade d'évolution, à la formation d'une pseudo-steppe à Piadia et chiendent (région d'Ambovombe, par exemple), d'une savane à sakoa sur le socle cristallin, d'une palmeraie ou savane à satra sur les sols sableux du Karroo (région de Betioky).

Economie.— Le Sud de Madagascar est traditionnellement un pays d'élevage ; bien que les pâturages y soient médiocres ou saisonniers la densité du bétail est très supérieure à la densité humaine ; les recensements officiels pour 1955 donnaient, dans la zone considérée : 265.000 bovidés, 132.000 moutons, 210.000 chèvres. Faute de pâturages et d'eau en saison sèche, les troupeaux transhument loin vers le Nord, à la recherche de zones plus favorables.

Mise à part la culture industrielle du sisal, paradoxalement développée sur les sols fertiles de la vallée du Mandrare, les cultures ; essentiellement vivrières, sont localisées autour des villages et particulièrement, dans les zones côtières, dans les cuvettes dunaires abritées des vents ; l'importance des récoltes est fonction des pluies et les disettes sont fréquentes.

En dehors de l'industrie textile du Mandrare, il n'existe que quelques ateliers (peaux, huile), de rares exploitations minières (micá phlogopi-

te, grenat) sur le socle cristallin et quelques scieries. La main d'oeuvre est, relativement, surabondante et l'émigration est importante.

Le problème de l'eau.— L'amélioration des conditions de vie, encore primitives, le développement de l'économie et, plus simplement encore, la survivance de certaines populations sont soumis à la résolution préalable du problème de l'eau qui, avec plus ou moins d'acuité suivant les régions et les époques, se pose partout, dans tous les domaines.

En saison pluvieuse, bêtes et gens s'alimentent en eau aux rivières, mares et puits, souvent dans les pires conditions d'hygiène ; en sécheresse, seules les nappes souterraines fournissent une eau permanente ; les villages, éloignés parfois de plusieurs dizaines de kilomètres d'un point d'eau, utilisent alors parcimonieusement l'eau de pluie emmagasinée dans des citernes (une solution originale étant celle des "ranovato", littéralement pierre à eau, citernes naturelles plus ou moins aménagées) ; les précipitations occultes sur la végétation sont minutieusement recueillies ; en cas d'averse les ornières des pistes sont soigneusement asséchées pour remplir fûts et barriques et le transport de l'eau, par charrettes ou camions, fait l'objet d'un commerce fructueux. On conçoit que la qualité intervienne assez peu et qu'une eau contenant de 4 à 5 grammes de chlorures par litre, sans parler de son contenu solide, plus ou moins coloré, organique ou microbien, soit alors considérée comme potable pour les gens.

Cette limite est, pour les bovidés, portée à 10 grammes de chlorures par litre d'eau ; les troupeaux, pour la plupart, quittent d'ailleurs le pays en saison sèche, l'herbe des "pâturages" ne pouvant plus alors être consommée sans abreuvement suffisant. A ce sujet, la destruction récente des véritables forêts de "raketa" (figuier de Barbarie) qui couvraient le pays par la cochenille a supprimé un "aliment complet" du bétail et parfois des gens. En outre, la dégradation par l'homme de la végétation conduit à une dénudation lente mais nette ; un exemple typique est celui du canton d'Amborompotsy, dit autrefois "Canton des pâturages", où actuellement la couverture végétale est réduite à quelques touffes d'herbe sèche entre les pierres.

Du point de vue agricole, quoique le manque d'eau soit souvent catastrophique, il faut dire dès maintenant que le problème semble plus difficile à résoudre. Les essais de pluie provoquée sont jusqu'ici décevants et les nappes souterraines n'ont en général pas un débit suffisant pour permettre une irrigation. Il existe toutefois quelques possibilités locales à partir des eaux superficielles (vallée du Mandrare et de la Menarandra, pour lesquelles il existe des études et projets anciens) ou des nappes alluviales (vallée de la Menarandra).

Enfin, l'alimentation des localités principales, en développement constant, pose d'importants problèmes tant en ce qui concerne la quantité que la qualité de l'eau.

HISTORIQUE

A défaut de documents préhistoriques et même historiques on ne peut avancer que des hypothèses en ce qui concerne la période précédant l'arrivée des Européens dans le Sud de Madagascar. Bien des points d'eau étaient certainement connus et exploités et probablement étaient-ils en plus grand nombre qu'aujourd'hui ; sans admettre comme certains auteurs une modification importante et récente du climat, on peut en effet penser qu'après les dernières périodes pluviales quaternaires, peut-être subcontemporaines des premiers habitants, l'eau devait être surabondante dans ces régions ; la fraîcheur des reliefs fluviaux, de la vallée de la Linta par exemple, en est un témoignage. Les nappes se sont progressivement abaissées, ont parfois tari, et les puits indigènes ont suivi l'enfoncement de l'eau jusqu'à la limite imposée par l'absence de moyens techniques et les coutumes (cinq mètres de profondeur en moyenne, dix mètres au maximum). Ce processus nous semble expliquer, en partie au moins, d'abord l'établissement puis la survivance de nombreux villages dans des régions actuellement deshéritées, aussi bien en ce qui concerne l'eau que les pâturages et les cultures.

Avant 1930, d'importants travaux de recherche d'eau ont été effectués par l'administration militaire, mais il n'existe guère de documents à ce sujet ; les premiers renseignements hydrogéologiques sont dus à CARLE (1910) pour la zone côtière Ouest, à GIRAUD (1912-b) pour l'extrême-Sud et Ambovombe, à REYNIER (1915) pour la région d'Ankazomanga. On saurait au total fort peu de chose sans la remarquable synthèse de R. DECARY (1930-1933) sur l'Androy, qui résume les travaux antérieurs et donne une carte d'ensemble ; il distingue, de l'intérieur vers la côte, une région des mares, une région des puits avec les nappes d'Ambovombe, Ambondro et Beloha, une région des "Ranovato". Du tarissement de quelques nappes il conclut à un dessèchement de l'Androy.

Les observations hydrogéologiques détaillées commencent en même temps que les levés géologiques systématiques avec H. BESAIRIE, d'abord dans la partie Nord du Mahafaly (1928) puis dans l'ensemble de la région (1934 à 1948, avec des interruptions) ; les points d'eau sont relevés sur les itinéraires géologiques, une mission spécialement consacrée à l'hydrogéologie a lieu en 1939 dans la région d'Ambovombe, le plateau calcaire Mahafaly est exploré en 1948 par la brigade RAJAONARIVELO. Ces recherches aboutissent d'une part à la publication de la carte géologique de reconnaissance à l'échelle du 1/200.000 (BESAIRIE, 1948-d et 1949), contenant de nombreux renseignements sur les ressources en eau, d'autre part à la rédaction d'une première synthèse (1944) complétée ensuite (BESAIRIE, 1948-a; réédition en 1955-a). Cette Hydrogéologie du Sud de Madagascar donne un premier inventaire des points d'eau, avec indications sur la qualité des eaux ; les nappes aquifères sont situées et étudiées dans leur cadre géologique et les recherches possibles sont indiquées pour chacune d'elles ; la nécessité des études topographiques, sondages, analyses, études sur les variations des nappes, est mise en évidence.

En ce qui concerne les réalisations pratiques, cette même période (1930-1948) a vu la création de puits dans l'Androy (TOXAY), des sondages suivant le projet de voie ferrée Sakoa-Mozambique (BESAIRIE, 1943; X..., 1944), un sondage à Ambovombe (BESAIRIE, 1945-a).

A la suite d'une grave disette ayant fait suggérer une évacuation totale de l'Androy, une conférence administrative tenue à Ambovombe en Décembre 1948 décide d'intensifier et accélérer recherches et réalisations. R. PAVLOVSKY (1949-1950) étudie en détail la zone côtière et de nouveaux puits y sont créés, ainsi qu'à Ambovombe (CHEVRIER, 1950). Une première carte hydrogéologique à l'échelle du 1/500.000 est publiée (BESAIRIE et PAVLOVSKY, 1950) ; elle fait le point des connaissances acquises, précise les zones favorables aux recherches en indiquant la profondeur probable des nappes, fixe les emplacements de travaux. En 1952-1953 a lieu une première campagne de 45 sondages entre 6 et 70 mètres de profondeur, totalisant 1522 mètres; bien que donnant seulement une dizaine de résultats positifs utilisables et conduits sans surveillance géologique, ces sondages confirment l'existence de nappes aquifères dans la zone interne de l'Androy sédimentaire (régions d'Ambaliandro et de Beloha) et montrent l'importance des formations continentales néogènes.

Une seconde série de sondages est immédiatement préparée par de nouvelles études de R. PAVLOVSKY dans le Mahafaly (1954) et J. de SAINT OURS dans l'Androy (1954) et la Cuvette d'Ankazomanga (1955-b-c). Le programme (BESAIRIE, 1954) est réalisé partiellement en 1955, toujours sans contrôle géologique direct. Sur 25 sondages entre 10 et 66 mètres de profondeur, totalisant 765 mètres, dix donnent des résultats positifs. D'autres sondages sont effectués dans la nappe phréatique d'Ambovombe (BESAIRIE, 1955-b) pour étude d'une adduction d'eau et J. de SAINT OURS étudie la région de Soalara pour l'alimentation en eau d'une cimenterie en projet (SAINT OURS et GIRAUD, 1956).

La période 1955-1958 est marquée au début par la première mission de J. ARCHAMBAULT ; dans son étude (1956), réinterprétant les données antérieures, il met en relief les perspectives offertes par les nappes profondes (nappe du Néogène continental) et, du point de vue technique, insiste sur la nécessité d'une part des études générales, d'autre part d'une organisation rationnelle, avec contrôle géologique des travaux et interprétation continue des résultats. Cette période comporte ensuite l'inventaire systématique des points d'eau avec établissement de fiches et cartes au 1/100.000 (AUROUZE, 1957-a-b), une nouvelle mise au point sous forme de carte hydrogéologique au 1/500.000 (AUROUZE, 1957-c-d), la multiplication des études de détail sur l'alimentation en eau des localités importantes, les premières études du débit des puits (AUROUZE, 1958-a-o) et l'élaboration de très nombreux programmes de travaux. En ce qui concerne les réalisations, une première station de pompage par éolienne est achevée en 1956 (Ambaliandro), plusieurs puits sont créés ou remis en état (A. RIGOT, inédit et J. AUROUZE, 1958-h) et, après

quelques tentatives décevantes de sondages directs d'exploitation, la mise en oeuvre d'une technique de reconnaissance rapide par sondage rotary avec contrôle géologique aboutit à une série de résultats positifs immédiatement exploités.

En 1958, devant l'importance des travaux à entreprendre pour tenter de résoudre l'ensemble du problème de l'alimentation en eau est apparu enfin l'intérêt de nouvelles études géologiques et d'une prospection géophysique préliminaire. Des sondages électriques ont débuté en Novembre 1958, des études stratigraphiques sont reprises dans le plateau calcaire Mahafaly, de petits sondages dans les nappes suspendues sont envisagés.

Il ressort de cet historique rapide que l'hydrogéologie dans le Sud de Madagascar a eu, et a toujours un but essentiellement pratique, ce qui est parfaitement normal, mais que la faiblesse des moyens, au regard du problème posé a conduit trop souvent à négliger, faute de temps, l'étude de certains éléments géologiques de base indispensables. D'autre part, en fonction des disettes graves en eau, il y a une certaine "périodicité" dans l'intensité des recherches, en partie compensée par la permanence du personnel (H.BESAIRIE) et qui semble d'ailleurs s'atténuer progressivement.

BUT, PRINCIPES ET PLAN DU MEMOIRE

Contrairement à ce que pourrait suggérer le titre de ce mémoire, choisi pour sa concision, nous ne prétendons certes pas présenter ici une étude complète et définitive sur l'hydrogéologie du Sud de Madagascar, étude qu'il ne sera peut-être possible d'entreprendre que dans de nombreuses années, à supposer que toutes les questions soient alors résolues. Notre ambition se borne à tenter un nouvel examen d'ensemble des problèmes hydrogéologiques, à la lumière des résultats récents, acquis avant la fin de 1958.

Une grande partie de la documentation sur cette question est difficilement accessible dans les archives administratives de Madagascar et son volume rend malaisée l'interprétation synthétique des données recueillies ; sans être neuf le sujet était donc dans une certaine mesure réservé aux spécialistes locaux ; nous espérons que ce travail permettra de faire plus facilement d'utiles comparaisons avec d'autres régions arides, où les recherches d'eau prennent de plus en plus d'importance.

D'autre part, dans les dernières années, nous avons effectué une série d'observations analytiques souvent détaillées (qui, rassurons le lecteur, n'apparaîtront dans les pages qui suivent que sous forme condensée ou figurée et, dans toute la mesure du possible, coordonnée) que nous n'avons pu exploiter immédiatement de façon complète, en raison du temps à consacrer aux

opérations techniques. Il en ressort un certain nombre de conclusions ou d'hypothèses nouvelles qui peuvent permettre une meilleure interprétation des travaux à venir, des prospections géophysiques par exemple, et orienter les recherches futures de façon plus précise et plus efficace.

Il est un caractère commun à la majorité des travaux antérieurs, y compris les nôtres : les impératifs techniques ont conduit soit, comme nous l'avons vu dans l'historique, à négliger les études théoriques, soit à inclure ces études dans des rapports ou programmes essentiellement pratiques où elles restent dans la plupart des cas ignorées. Il ne peut être évidemment question d'établir une cloison étanche entre ce qui serait une "hydrogéologie théorique" et les recherches d'eau ; celles-ci s'appuient sur celle-là qui profite elle-même des résultats pratiques ; nous pensons cependant qu'entre les deux aspects inséparables de l'hydrogéologie il n'est pas mauvais de considérer en premier lieu son côté scientifique et plus spécialement géologique et de lui donner la primauté, faute de quoi les recherches d'eau seraient livrées au hasard ou, ce qui revient au même, aux "sourciers".

Nous nous sommes attachés à séparer nettement, pour chaque problème, les faits observés des conclusions que l'on est actuellement en droit d'en tirer, en nous efforçant de ne pas tomber dans le travers qui consiste à considérer comme probable ce qui n'est que possible et certain ce qui n'est que probable. Nous avons d'ailleurs été encouragés dans cette voie par la prudence puisque, pour les sciences appliquées en général et l'hydrogéologie en particulier, des conclusions erronées peuvent avoir des conséquences pratiques importantes et coûteuses.

Cependant, lors même que les données sont insuffisantes, ce qui est souvent le cas, il n'est pas interdit d'émettre des hypothèses et d'examiner quelles sont les plus vraisemblables. Ceci nous a amené à indiquer les études et travaux qui permettraient de lever les indéterminations et, par là même, d'entreprendre avec de meilleures chances de succès d'autres recherches d'eau, revenant ainsi à l'aspect pratique de l'hydrogéologie que nous avions paru négliger au départ.

Construit suivant ces principes, notre exposé comprend d'abord un chapitre purement géologique dont l'utilité apparaîtra au chapitre suivant, spécialement à propos des conditions géologiques d'existence des nappes aquifères. La question de l'alimentation des nappes, assez controversée et pour laquelle nous manquons d'observations suffisamment longues et d'expériences, sert de préambule au chapitre "Hydrogéologie" dans lequel sont étudiés les divers systèmes aquifères et les problèmes posés par chacun d'eux. Un essai de classification des nappes aquifères du Sud de Madagascar, le rappel des données et hypothèses récentes et des principaux points à étudier, avec des indications sur les méthodes à employer servent de conclusion.

La bibliographie donnée in fine est strictement limitée au sujet, les autres références étant indiquées en notes infra-paginales.

G E O L O G I E

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

INTRODUCTION

L'étude géologique détaillée du Sud de Madagascar se heurte à deux obstacles pratiques : recouvrement du sous-sol par des formations d'origine secondaire, peu épaisses en général mais très continues, difficultés d'accès dues au bush épineux et au manque d'eau. Néanmoins, les grands traits de la géologie étaient acquis et publiés dès 1948-1949 (H. BESAIRIE).

Les levés sur le terrain sont maintenant largement facilités par la couverture photographique aérienne et les cartes régulières au 1/100.000 qui en dérivent, mais qui ne couvrent pas encore toutefois une partie du plateau calcaire Mahafaly. Des tracés plus précis des contours sont rendus possibles par la photogéologie ; c'est ainsi qu'une nouvelle carte au 1/200.000 d'une partie du plateau calcaire a été établie à partir de minutes au 1/80.000 et que la carte au 1/500.000 de la planche IV donne des contours plus détaillés pour le socle cristallin et l'Eocène que les cartes antérieures au 1/200.000. Les études futures auraient pu être grandement facilitées si nous avions pu disposer du temps et du matériel nécessaire pour une prospection photogéologique complète du Sud sédimentaire de Madagascar.

Nous avons en outre effectué ces dernières années quelques levés géologiques à grande échelle, malheureusement incomplets, qui fournissent des indications nouvelles, en particulier dans les régions suivantes : zone littorale à l'Ouest du Cap Sainte Marie, région de la basse Menaran-dra, rebord Ouest du plateau calcaire Mahafaly.

Les sondages sont d'une grande importance pour la connaissance de la géologie ; bien qu'effectués en carottage continu, ceux des campagnes 1952 à 1955 ont été conduits sans contrôle géologique permanent et les échantillons communiqués sont souvent insuffisants pour corriger les coupes des sondeurs ; c'est seulement à partir de 1957 que les logs ont été établis sur place par un géologue, mais cette fois sans aucun carottage. Il faut remarquer en outre que la plupart des sondages ont été effectués dans les régions Sud-Est et que, au Nord de la Linta, seul le tracé de la voie ferrée Sakoa-Mozambique a été étudié par sondages, peu profonds d'ailleurs. Une énorme zone comprenant le plateau Mahafaly et le plateau Karimbola reste inexplorée. Le sondage le plus profond a été celui d'Ambovombe (ferme), qui n'a pas atteint 180 mètres.

En ce qui concerne la géologie profonde, on ne peut utiliser actuellement que de rares données géophysiques : mesures de gravité espacées⁽¹⁾, étude gravimétrique de détail dans la région Tsihombe-Beloha-Cap Sainte-Marie⁽²⁾, profil sismique de la Société des Pétroles de Madagascar suivant le couloir d'Itombona, pour lequel nous ne disposons d'ailleurs que d'une coupe-temps partielle à petite échelle. Quelques hypothèses peuvent être faites par extrapolation à partir des sondages au pétrole effectués dans la région plus au Nord (Tuléar, Bezaha, Andavadoaka).

Au total, nos connaissances sont assez inégales suivant les régions et les étages et l'exposé qui suit, pour lequel nous empruntons beaucoup aux travaux antérieurs, sera forcément assez hétérogène. Provisoirement, la série stratigraphique peut se résumer de la façon suivante :

ACTUEL

- Marin : Formations littorales ; vases d'estuaires.
Continental : Dunes vives ; alluvions ; carapaces (en partie).

QUATERNAIRE (sensu lato)

- Marin : Formations littorales ; vases.
Continental : Dunes fixées ; carapaces sableuses, ferrugineuses, calcaires (en partie) ; dépôts lacustres ; sables, grès à ciment calcaire, calcaires à Aepyornis et Clavator.

(1) CATTALA R.P., 1954.- Gravimétrie à Madagascar. Interprétation tectonique du Sud et de l'Ouest. Trav.Bur.Géol.Madagascar, n°59, 7 p., 2 pl., 2 cartes hors texte.

(2) CATTALA R.P., 1956.- Note sur l'étude gravimétrique du plateau Karimbola. Arch.Serv.Géol.Mad. A.966. 3 p., 2 pl.

PLIOCENE

- Marin : Inconnu.
Continental : Coulée volcanique de Lavanono ; sables, grès, argiles, cherts, conglomérats du "Néogène continental" (en partie).

MIOCENE

- Marin : Douteux, avec grès à Cyphus du Cap Sainte Marie ; sommet du plateau calcaire Mahafaly (?).
Continental : "Néogène continental" (en partie).

OLIGOCENE

- Marin : Douteux, avec calcaires du Cap Sainte Marie ; sommet du plateau Mahafaly (?) ; dolomies et marnes d'Ankitry (?).
Continental : Inconnu. Période probable d'érosion intense.

Eocene

- Entièrement marin : Calcaires et marnes à Huîtres,
Calcaires à Alvéolines,
Calcaires à Lithothamnium.

CRETACE

- Sénonien supérieur marin transgressif.
Coulées volcaniques.
Crétacé inférieur et moyen mi-marin mi-continental, avec des lacunes.

JURASSIQUE SUPERIEUR ET MOYEN

- Marin : Calcaires et grès.

CARBONIFERE à LIAS = KARROO

- Continental avec rares intercalations marines. Groupes de l'Isalo, de la Sakamena, de la Sakoa.

PRECAMBRIEN

- Métamorphique : Schistes cristallophylliens (en majorité paragneiss) et roches éruptives.

Dans la description ci-dessous nous suivrons l'ordre stratigraphique, en groupant toutefois Précambrien et formations volcaniques dans le même paragraphe (socle cristallin). Dès maintenant, il faut d'ailleurs préciser que les attributions d'âge, de l'Eocène à l'Actuel, sont sujettes à caution, aussi bien pour les formations marines encore incomplètement étudiées du point de vue paléontologique que pour les sédiments continentaux. Il s'agit donc d'une stratigraphie locale, pour laquelle nous avons préféré étendre, un peu abusivement peut-être, la signification des étages classiques plutôt que de créer une terminologie provisoire mais encombrante.

PRECAMBRIEN. - Les affleurements principaux sont situés en bordure interne de la région étudiée, mais le Précambrien constitue évidemment le substratum des terrains sédimentaires. Nous insisterons surtout sur les caractères intéressants du point de vue hydrogéologique.

Localisation. - La carte géologique au 1/500.000, planche IV, donne les contours des affleurements pour la moitié Sud de la zone considérée ; plus au Nord, le contact sédimentaire-cristallin suit approximativement les vallées de la Linta et de son affluent de droite Anakalana jusqu'à Andranoabo, puis s'infléchit vers le Nord-Est, en direction du bassin charbonnier de la Sakoa.

En dehors des deux caps principaux du socle vers le Sud : éperon de Tsihombe dans le bassin du Manambovo, éperon du Kokomba dans celui de la Menarandra, il existe des affleurements isolés au milieu des formations sédimentaires. Au Nord-Ouest de Beloha, le socle, recouvert par un Néogène peu épais, est sub-affleurant et le véritable bassin sédimentaire ne commence qu'au Sud d'une ligne Ampotaka-Beloha-Tsihombe. A 17 kilomètres au Sud-Est de cette dernière localité, un pointement granitique est également connu près d'Ambolonaondry (X=76,8 ; Y=315), à 118 mètres d'altitude. En bord de mer, les affleurements signalés autrefois à Antaramaity ont été retrouvés plus au Nord-Ouest, sur 3,5 kilomètres le long du rivage, 5 kilomètres au Sud-Sud-Est du village Lavanono, vis-à-vis du récif Albatros, également constitué par le socle ; les pointements les plus élevés sont à l'altitude de 29 mètres au lieu dit Andololava.

Au Nord de la Menarandra, quelques affleurements isolés existent à l'Est d'Antaimby et nous avons découvert un îlot du socle sur la piste allant d'Ankazontaha à Ampanihy, à la cote 200, 7 kilomètres au Sud du confluent Manakaralahy-Linta (X=172,5 ; Y=205). Au Nord de la Linta, il n'y a à signaler qu'un petit cap cristallin au Nord du signal Vohimiroro, qui témoigne d'une topographie ancienne du socle, car il s'élève à 240 mètres d'altitude, alors qu'au Sud et au Nord le mur du sédimentaire est à une altitude inférieure à 200 mètres.

Inversement, il existe des placages sédimentaires à l'intérieur de la zone précambrienne : Néogène continental de la région de Behara, à l'Est du Mandrare, grès et sables probablement également néogènes dans l'éperon de Tsihombe, en particulier à Jafaro (avec une épaisseur de 7 mètres reconnue par sondage) et à Marosoritra, plateau de Lovokarefo, s'avancant vers le Nord jusque dans la région de Bekitro, témoins d'une pénéplaine néogène sur les tables de sommets au Nord d'Ampanihy (Vohibataza). Beaucoup plus au Nord, les plateaux sableux avec carapace ferrugineuse de l'Analamataity et de Fotadrevo peuvent être rattachés à la même surface d'érosion.

Morphologie. - Le socle cristallophyllien précambrien a l'allure générale d'une pénéplaine inclinée du Nord vers le Sud et l'Ouest, de 450 à 500 mètres dans la région de Bekily, à 250 mètres suivant une ligne Antanimora-Tranoroa-Ampanihy-Edjeda ; l'altitude moyenne décroît jusqu'à une centaine de mètres dans la partie Sud des éperons de Tsihombe et Kokomba. Cette pénéplaine comporte toutefois un réseau hydrographique très ramifié et des reliefs isolés, véritables "inselbergen" ; les plus importants dans la zone considérée figurent sur la carte, planche I^b ; ce sont, dans l'éperon de Tsihombe ceux d'Antanimora (461 m), de Vohimena (690 m), de Tsimandrotsy (473 m), de Vohibory (500 m), dans celui de la Menarandra, le Kokomba (187m), dans la région d'Ampanihy, ceux du Vohibataza (341 m).

La formation de la pénéplaine cristalline est encore mal élucidée ; il est probable qu'elle est ancienne car le climat semi aride actuel ne peut pas être responsable d'un tel relief, ni de l'altération profonde des roches. A titre d'hypothèse de travail, on peut concevoir l'évolution suivante : Dans une première période, peut-être oligocène, a eu lieu une érosion intense ne laissant en relief que les roches dures des inselbergen actuels et aboutissant à une surface d'érosion quasi tabulaire mais comportant cependant un réseau hydrographique bien individualisé. Cette surface a été remblayée par les sédiments continentaux (Néogène) qui ont été eux-mêmes pénéplanés. Une reprise de l'érosion vraisemblablement quaternaire a remis à jour l'ancienne surface oligocène dans toute la région Nord, en laissant subsister les inselbergen d'une part, des témoins de la pénéplaine néogène d'autre part (tables de la région d'Ampanihy, plateaux de la région de Bekily) ; ces témoins se relient d'ailleurs à la surface actuelle des sédiments néogènes dans la région Sud. Dans bien des cas, le réseau hydrographique actuel paraît se superposer exactement au réseau anté-néogène du socle ; c'est ainsi que, dans la région de Jafaro par exemple, on trouve sur les flancs des thalwegs des placages sédimentaires prouvant qu'il existait déjà une vallée dans les schistes cristallins.

Pétrographie. - Nous ne nous étendrons guère sur la nature pétrographique du socle précambrien, qui a peu d'intérêt pour notre sujet. Du Sud-Est au Nord-Ouest affleurent les systèmes suivants : Le système Androyen, le plus ancien, avec le groupe de Tranomaro à l'Est de Mandrare, pétrographiquement très varié, est caractérisé par l'extrême abondance de paragneiss calciques, magnésiens et sodiques, spécialement de wernérites ; le groupe d'Ampandrandava, du Massif volcanique de l'Androy à Tsihombe, est principalement formé de gneiss, migmatites et leptynites, avec abondance de pyroxénites à diopside et phlogopite ; le système du Graphite (groupe d'Ampanihy) affleure de Tsihombe jusqu'au delà d'Ampanihy ; il est caractérisé par le grand développement des couches à graphite, avec des leptynites et des gneiss amphiboliques souvent riches en grenat ; plus au Nord le système du Vohibory, avec le groupe du même nom, comprend surtout des gneiss amphiboliques, des **leptynites et des cipolins.**

Au total, le fait important pour nous est l'abondance, dans tous les groupes, de roches calciques et magnésiennes, parfois de roches sodiques, susceptibles de donner un caractère chimique particulier aux eaux des nappes.

La tectonique complexe des schistes cristallins n'a pas d'intérêt pour nous, sauf en ce qui concerne les bancs de roches compactes, leptynites et filons granitiques en particulier, pouvant former des barrages hydrauliques dans le socle et des barres rocheuses sous les formations sédimentaires.

Dans toutes les régions, les schistes cristallins comportent au sommet une épaisse zone d'altération météorique, fissurée et arénisée, dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de mètres ; comme nous l'avons vu, cette altération est probablement ancienne et cette zone perméable existe aussi, dans la plupart des cas, sous les terrains sédimentaires. Localement, en particulier sur les affleurements de roches calciques (cipolins, pyroxénites, amphibolites) se développent d'épaisses carapaces calcaires secondaires.

Contact sédimentaire-socle. - Le plus souvent, le contact du sédimentaire sur le socle cristallin est normal, sans faille ni escarpement, ce qui rend d'ailleurs malaisé un tracé précis des contours : les formations sédimentaires sont précédées par de minces placages à galets et carapaces ferrugineuses sur le socle, que l'arénisation fait lui-même ressembler aux sédiments continentaux grossiers. Au Sud d'Antanimora, le sédimentaire débute en contrebas des hauteurs gneissiques par un glacis où éboulis, éluvions et Néogène continental sont pratiquement indifférenciables. Autour du plateau de Lovokarefo, dans la région du Kokomba et dans celle d'Ampanihy, on relève par contre en de nombreux points une cuesta de quelques mètres du sédimentaire sur le cristallin. Dans la vallée de la Linta, le contact est masqué par les alluvions ; il redevient visible et normal à partir d'Ejeda, puis, entre Andranoabo et la Sakoa, au contact du Karroo, comporte une série complexe de failles.

FORMATIONS VOLCANIQUES - Massif de l'Androy. - Le massif volcanique de l'Androy, dont seule la terminaison méridionale se trouve dans la région étudiée, affleure au Nord du bassin sédimentaire d'Ambovombe ; il est constitué essentiellement par des coulées basaltiques et rhyolitiques reposant directement sur le socle précambrien à l'Est et à l'Ouest et disparaissant sous les formations néogènes vers le Sud. Ces coulées forment d'importants reliefs qui limitent au Nord le bassin endoréique : massif de l'Angavo à l'Ouest, culminant à 530 mètres, Vohipotsy au centre (457 m) ; vers l'Ouest, le relief est abaissé par l'érosion du Mandrare et de ses affluents, pour atteindre à nouveau sur la rive gauche du fleuve des altitudes de 300 à 400 mètres. D'après ces reliefs, on doit admettre que la puissance totale des coulées peut être supérieure à 300 mètres dans cette région ; par simple analogie avec le

volcanisme de la côte Est de Madagascar, on attribue à ce système volcanique un âge sénonien.

Dykes. - Traversant les schistes cristallins précambriens, il existe au Nord d'une ligne Antanimora-Tranoroa-Ejeda de très nombreux dykes basaltiques ou doléritiques, de puissance variable mais très continus, dont la direction est très constante (Nord 60° Ouest). Ces dykes n'affleurent pas dans notre région, mais sont susceptibles d'exister sous les formations sédimentaires où ils pourraient influencer sur l'écoulement des nappes aquifères dans le socle. On attribue également à ces dykes un âge sénonien.

La coulée de Lavanono, en bordure du rivage, découverte en 1956, affleure de façon discontinue sur 2,5 kilomètres entre le village de Lavanono et les affleurements précambriens sur lesquels elle repose au Sud. Au Nord, on voit au contact de la coulée des argiles grises attribuables au Néogène, recuites et rubéfiées. Immédiatement au-dessus se trouvent des grès à galets de basalte et coquilles récentes. Il s'agit donc d'un témoin, très petit, il est vrai, d'un volcanisme récent, probablement pliocène ou quaternaire, dont la fissure émissive est visible sur le rivage et se prolonge par une faille provoquant une petite falaise Nord-Sud, à regard Ouest, dans les grès quaternaires du sommet du plateau Karimbola ; il y a là une preuve de mouvements tectoniques récents.

Une analyse chimique montre qu'il s'agit d'une dacitoïde mésocrate où le quartz n'est pas visible en lame mince (paramètres de LACROIX : II(III).4(5).4.3. / (2)3.1.1(2).3'7. Les paramètres de NIGGLI sont tout à fait comparables à ceux des intrusions basaltiques certainement post-éocènes du Sud de Befandriana, au Nord-Ouest de Tuléar.

CARTE STRUCTURALE. - Sur la carte au 1/500.000 de la planche II, nous avons tenté une reconstitution structurale du toit du socle cristallin sous les formations sédimentaires. Il s'agit évidemment d'un essai tout provisoire qui devra être modifié, complété et précisé au fur et à mesure des données nouvelles (sondages et géophysique).

Bassin d'Ambovombe. - La première question qui se pose dans la partie Est de la carte est celle de l'extension possible des coulées volcaniques de l'Androy sous le sédimentaire. Elles ont été rencontrées dans deux sondages : A Ambatolahy, en bordure Sud du Massif de l'Angavo, leur toit est à l'altitude de 144 mètres, sous 26 mètres de formations superficielles ; il s'agit là d'un tuf rhyolitique entièrement silicifié, avec pyrite et traces de sphérolites ; la base de la coulée n'a pas été atteinte à la cote 120.

A Ankatrafay, au Sud d'Ilotaka, des trachytes ont été touchés à l'altitude + 15 m sous une série continentale épaisse de 95 mètres ; des affleurements volcaniques se trouvant moins de 5 kilomètres au Nord à l'altitude + 100, on doit supposer l'existence de reliefs enterrés importants, analogues aux reliefs de la zone d'affleurement du massif, et imprévisibles par les méthodes ordinaires de la géologie.

Les quelques mesures gravimétriques dont nous disposons montrent une anomalie positive croissante d'Antanimora à Ambovombe d'une part, d'Amboasary à Ambovombe d'autre part, avec un maximum de + 72,14 milligals dans cette ville ; on pouvait supposer que les coulées volcaniques se prolongeant jusqu'à Ambovombe étaient responsables de cette anomalie. En fait, le sondage Ferme Ambovombe a rencontré le socle précambrien à la cote -49, immédiatement sous les formations sédimentaires. L'anomalie gravimétrique n'est donc pas expliquée et on est conduit à se contenter, pour la limite Sud d'extension des coulées, d'une ligne conventionnelle reliant simplement les derniers affleurements connus (planche IV) ; les isobathes de la planche II dans cette zone s'appuient essentiellement sur les cotes d'affleurement du socle à l'Est du Mandrare..

Au Sud-Ouest du Massif volcanique, la bordure rectiligne de l'Angavo suggère une faille de direction Nord-Ouest-Sud-Est que la topographie conduit à prolonger vers le Sud-Est, en limite Nord de la cuvette d'Ampamolora qui correspondrait au compartiment effondré.

Dans la partie Ouest du Bassin d'Ambovombe, le tracé des isobathes s'appuie d'une part sur les cotes d'affleurements du socle au Nord et à l'Ouest, d'autre part, sur les altitudes et les cotes minima fournies par d'assez nombreux sondages, ceci en supposant naturellement que, sous les terrains sédimentaires, le socle a, comme plus au Nord, l'allure générale d'une pénéplaine, aux exceptions près déjà signalées, inselbergen et vallées fossilisées. Suivant ces données, la pente du toit du socle serait de l'ordre de 8 pour mille vers le Sud-Est jusqu'à l'isobathe 0 ; la pente serait ensuite de l'ordre de 4 pour mille jusqu'à l'aplomb du rivage où le Précambrien serait entre moins 50 et moins 100 mètres. On peut supposer que la partie méridionale du bassin formait autrefois un golfe où ont pu s'accumuler des sédiments épais, y compris des formations marines (découvertes d'ailleurs dans le forage Ankitry, au Sud d'Ambondro).

En bordure Ouest du bassin d'Ambovombe, nous avons figuré une faille Antanimora-Faux Cap, mais avec de minces arguments : aspect rectiligne du contact cristallin-sédimentaire, alignement d'inselbergen du cristallin à l'Ouest du contact dans l'éperon de Tsihombe, passage de la faille supposée à l'Ouest immédiat du pointement cristallin d'Ambolonaondry.

Bassin de Beloha. - Entre Beloha et le plateau de Lovokarefo, de nombreux affleurements et les sondages, qui ont tous trouvé le socle précambrien à

faible profondeur, permettent de tracer des isobathes assez précises ; on constate l'existence d'un bombement du toit du socle, d'axe incliné Nord-Sud, passant à l'Ouest de Beloha et entaillé vers l'Ouest par les affluents de la Menarandra. Dans la partie Est du bassin, les sondages Famatalefo et Beantsiva n'ont pas atteint le Précambrien, respectivement aux cotes 133 et 139, alors qu'il se trouve à 183 mètres au sondage Andranolava, moins de 5 kilomètres à l'Ouest de Famatalefo ; il y a là une anomalie qui doit s'interpréter soit comme une vallée fossile dans le socle (ancien cours du Manambovo ?), soit, et c'est ce que nous avons fait, comme due à une faille ; nous avons prolongé cette faille au Sud jusqu'au Cap Sainte Marie car la gravimétrie indique dans cette région un môle "lourd" (maximum de l'anomalie : + 32,69 milligals au Nord du Cap) avec à l'Est une anomalie négative accentuée (-8,06 milligals) dans la région de Marovato, ce qui correspondrait assez bien avec une faille à regard Est. Au Sud du Kokomba nous avons également figuré une faille très hypothétique de même direction Nord-Nord-Est Sud-Sud-Ouest qui limiterait à l'Ouest un petit ensellement du toit du socle.

Dans la partie Sud du bassin de Beloha, on ne dispose d'aucune donnée sur la profondeur du socle cristallin ; il n'est pas impossible qu'il existe un abaissement brusque, dû à une faille ou à une falaise fossile, suivant une ligne Ampotaka-Beloha-Tsihombe, mais ceci est encore du domaine des hypothèses. Dans cette zone, nous avons donc simplement figuré les affleurements de Lavanono et la petite faille récente signalée à propos des coulées volcaniques.

Bassin d'Ampanihy et zone Nord..- Au Sud et au Sud-Ouest d'Ampanihy seuls les sondages Teranombitelo et, récemment, Ankenta ont atteint le socle cristallin, respectivement aux altitudes +131 m et +46 m ; les autres forages donnant seulement des cotes minima. D'après les affleurements et ces sondages, la pente du toit du socle est ici en direction du Sud-Ouest, donc de la mer, de l'ordre de 10 pour mille, avec de petits accidents correspondant aux barres rocheuses inaltérées (Ouest d'Antaimby). On ne possède aucun renseignement sur la profondeur du Précambrien sous le plateau calcaire jusqu'à la mer.

Au Nord de la Linta, il n'a pas été possible, faute de données, d'estimer forme et profondeur du toit du socle cristallin. En raison de la présence le long du littoral, dans la région d'Itampolo, d'accumulations importantes de sables grenatifères, H. BESAIRIE⁽¹⁾ avait conclu à une faible profondeur des gneiss à l'aplomb du rivage. Nous pensons plutôt que

(1) BESAIRIE H. 1948.- Recherches géologiques à Madagascar. Deuxième suite. L'extrême Sud et le Sud-Sud-Est. Mémoire ronéotypé du Service géologique de Madagascar, et 1949.- Carte géologique de reconnaissance au 1/200.000, feuille Itampolo (603).

ces accumulations proviennent simplement du tri des sables alluvionnaires, dont le matériau originel est naturellement le socle précambrien, qui ont pu être transportés sur de grandes distances par les courants côtiers et le vent. Il existe du grenat en abondance dans les dunes de la région (certaines d'entre elles portent le nom de Fasimena, littéralement sable rouge) et les accumulations littorales sont concentrées dans la baie de Satrapaly, précisément située à l'abri des courants et vents dominants du Sud-Sud-Est.

Plus au Nord, suivant le couloir d'Itombona, un profil sismique indique que le socle cristallin est très profond à hauteur du rivage et, dans les sondages côtiers plus au Nord, il était loin d'être atteint à Tuléar à 2195 mètres de profondeur et à Andavadoaka, à près de 4000 mètres.

Les coupes géologiques des planches III^a et III^b illustrent nos connaissances - et nos ignorances. On remarquera en particulier la différence de puissance des formations sédimentaires dans la partie Nord des coupes 8 et 9, proches l'une de l'autre, mais situées de part et d'autre de la faille supposée du Cap Sainte Marie. Pour les coupes 3 à 7, il n'est pas absurde d'imaginer, à la place des points d'interrogation, une faille limitant à l'Est le bassin sédimentaire véritable.

SEDIMENTAIRE ANTE-SENONIEN

La coupure inusuelle faite ici dans les formations sédimentaires au niveau des coulées basaltiques santoniennes est justifiée par le fait que les formations antérieures n'affleurent qu'à l'extrême Nord-Est de la zone étudiée, dans la région de Betioky, tandis que le Crétacé supra-basaltique, puis l'Eocène sont très largement transgressifs vers le Sud, jusque sur le socle cristallin.

KARROO. - On sait que le Karroo malgache a été divisé en trois groupes séparés par des discordances. Le groupe inférieur, de la Sakoa, n'affleure pas dans la région étudiée ; celui de la Sakamena est représenté, de façon incomplète, par sa partie inférieure au Nord d'Andranoabo, avec un conglomérat à la base puis des grès et schistes à Glossoptéris ; les niveaux supérieurs à prédominance schisto-argileuse manquent ou sont masqués par la carapace sableuse. Le groupe de l'Isalo, avec l'Isalo I (Néotrias à Eotrias supérieur), constitué par des grès grossiers à stratification entrecroisée, affleure en contrebas de la petite falaise Néogène et Crétacée qui limite à l'Est le plateau du Vohitsara ; l'Isalo II (Lias-Rhétien), qui paraît séparé du premier par une faille entre Ambatry et l'Onilahy à l'Est de Bezaha, affleure dans la région de Betioky ; il comporte aussi essentiellement des grès continentaux, mais avec des intercalations de puissance et d'extension variables de lentilles d'argilites.

Du point de vue morphologique, la topographie accidentée de la Sakamena dans la dépression de la rivière Sakamena et de ses affluents de droite (Lambomaty) contraste avec la plaine formée par les grès de l'Isalo. En ce qui concerne la tectonique, ces séries sont, dans l'ensemble, monoclinales vers l'Ouest-Nord-Ouest avec des pendages de 15° à 10° dans le groupe de la Sakamena, dont la puissance est supérieure à 2.000 mètres, des pendages un peu inférieurs pour l'Isalo, également très épais. Remarquons toutefois que la photogéologie révèle un très net mouvement péri-synclinal dans la Sakamena dont le point le plus méridional, avec des pendages Nord, se trouve en X=232 ; Y=200.

JURASSIQUE. - La série marine commence dans cette région au Lias supérieur-Bajocien avec des calcaires à Polypiers reposant sur les grès de l'Isalo II et formant les cuestas du Bokaloha et d'Anjeba-Motondava au Nord et à l'Ouest de Betioky ; des intercalations sableuses continentales à bois fossiles existent encore dans le Bajocien, puis des grès marins à Anabacia, puis Cadomites forment le Bathonien, surmonté par des calcaires détritiques et oolithiques à Macrocephalites (couches de passage du Bathonien au Callovien). L'ensemble de la série a une puissance d'environ 150 mètres et affleure entre Tongobory et Ranonda, dans la vallée de la Menarandroy, sans dépasser vers le Sud le parallèle d'Ambatry.

CRETACE INFRA-BASALTIQUE. - Le crétacé infra-basaltique est connu en affleurements à l'Ouest du Jurassique, dont il est séparé par une faille au Nord, jusqu'à 25 kilomètres environ au Sud de l'Onilahy. Il constitue les pentes du plateau formé par les coulées basaltiques (sakalavites) sus-jacentes.

La série stratigraphique est la suivante⁽¹⁾, de bas en haut :

Hauterivien : grès verts glauconieux, à Duvalia, transgressifs sur les couches à Macrocephalites.
 Albien : grès à Douvilleiceras, épais d'environ 10 mètres.
 Cénomanién : couches grés-marneuses à fossiles pyriteux, puis grès à concrétions et nodules calcaires (50 à 150 mètres).
 Turonien : grès à Vascoceras (20 mètres).
 Coniacien : grès gypsifères à Inocérames (40 mètres).
 Santonien : grès continentaux.
 Basaltes : coulées de quelques dizaines de mètres de puissance formant un replat topographique large de 2 à 4 kilomètres entre l'Onilahy au Nord et à l'Est du signal Ianakatsamby au Sud.

(1) BESAIRIE H. et COLLIGNON M., 1956.- Lexique stratigraphique international. Vol. IV, fascicule 11. 20^e Congrès géologique international.

EXTENSION DU SEDIMENTAIRE ANPE-SENONIEN. - Nous avons vu que ces formations sont limitées en affleurements vers le Sud à une ligne Ianakatsamby-Andranoabo ; la question se pose, et a une grande importance hydrogéologique, de leur extension sous le plateau calcaire Mahafaly, aussi bien vers le Sud et le Sud-Ouest que vers l'Ouest. Nous ne disposons pour y répondre, très incomplètement, que du profil sismique du couloir d'Itombona et des sondages au pétrole dans les régions plus septentrionales. Ceci ne peut permettre que des hypothèses.

En ce qui concerne le Karroo, et plus spécialement l'Isalo, des changements importants de facies sont possibles vers l'Ouest où, à l'aplomb du rivage, le profil sismique suggère une épaisse série marneuse ou argileuse (marine) au-dessus du socle cristallin très profond ; vers le Sud, en s'appuyant sur des considérations purement géométriques, on peut supposer que le bassin sédimentaire profond est limité à l'Est par une ligne Andranoabo-Itampolo.

Le Jurassique pose des problèmes analogues ; compte tenu du fait que la série stratigraphique est plus complète vers le haut au Nord de l'Onilahy, il est probable qu'il a aussi une plus grande extension verticale vers l'Ouest dans notre région. Vers le Sud et le Sud-Ouest, où il est directement recouvert par le Néocomien, aucune hypothèse n'est valablement possible.

Pour le Crétacé infra-basaltique, on dispose des données fournies par les sondages côtiers de Tuléar et d'Andavadoaka, 150 kilomètres plus au Nord, tous deux en dehors de la zone étudiée ; ces sondages sont en outre situés à l'Ouest de l'importante faille de Tuléar, limitant à l'Ouest le plateau calcaire éocène. A Tuléar, des marnes grises micacées ont été touchées à 2.108 mètres de profondeur, sous les basaltes crétacés, tandis qu'à Andavadoaka le sondage a traversé, à partir de 1.312 mètres et sur plus de 2.300 mètres une série crétacée indifférenciée, sans basaltes, de marnes et argiles noires plus ou moins sableuses ou micacées. Les prospections géophysiques⁽¹⁾ montrent qu'à l'Est de la faille de Tuléar, les basaltes crétacés sont seulement vers 800 à 900 mètres de profondeur, mais ne donnent aucune indication sur le facies possible du Crétacé sous-jacent. Il est donc à peu près certain, sans que l'on puisse préciser plus, qu'il y a à la fois un changement de facies et une augmentation de puissance du Crétacé infra-basaltique vers l'Ouest, ces caractères étant maxima à l'Ouest de la faille de Tuléar. Aucune donnée n'autorise d'hypothèse quant à l'extension vers le Sud-Ouest et vers le Sud, où le Crétacé infra-basaltique, sans basaltes intercalés, est recouvert en transgression par le Sénonien supérieur.

(1) CLIQUET P.L., 1957.- La tectonique profonde du Sud du Bassin de Morondava. Communication à la Conférence Géologique de la C.C.T.A. Tananarive.

SEDIMENTAIRE MARIN SENONIEN ET TERTIAIRE

Sous ce titre, c'est toute la géologie du plateau calcaire Mahafaly qu'il faudrait traiter ; ce serait dépasser le cadre fixé et, en outre, les inconnues sont encore si nombreuses dans cette région difficilement accessible qu'il est préférable de se limiter d'une part aux éléments provisoirement acquis, d'autre part à la description de quelques coupes de terrain, en ne discutant ensuite que les seuls problèmes pouvant avoir des conséquences hydrogéologiques.

SENONIEN SUPERIEUR. - Le Crétacé supra-basaltique est essentiellement constitué par des grès calcaires, où la paléontologie a permis de distinguer, dans certaines zones, les niveaux suivants⁽¹⁾ : (de haut en bas)

- 3 - Calcaires et marnes d'Ejeda à Bellardia vicina DOUV., Volutocorbis indica DOUV., Turritella vredenburgi DOUV., Haustator cf. congregatus DOUV., Lyria cf. turgidula DOUV.
- 2 - Grès calcaires d'Ambatry à Pachydiscus compressus SPATH., Spondylus calcaratus FORBES, Nordenskjöldia besairiei COLL., Roudaireia hourcqi COLL. Ce niveau est rapporté au Maëstrichtien.
- 1 - Calcaires et grès calcaires à Cidaris mahafalensis BESR., Arrhoges boulei COTTREAU, Volutilithes fanivelonensis BOULE et THEV., Alectryonia unguata SCHL.

Le Sénonien supérieur repose effectivement sur les basaltes dans la vallée de l'Onilahy et, vers le Sud, jusqu'à l'Est du signal Ianakatsamby, où il disparaît sous la carapace sableuse. Plus au Sud-Est, il n'est plus représenté que par le très mince niveau 2 (Maëstrichtien), intercalé dans la falaise Est du plateau de Vohitsara, entre le Néogène continental et les grès de l'Isalo, sur lesquels il est transgressif. Encore plus au Sud, seul affleure le niveau 3, plus ou moins masqué par les sables superficiels et les carapaces calcaires, mais que l'on peut suivre cependant depuis le Nord de Beahitse (parallèle X=220) jusqu'au Sud de la Linta (parallèle X=175) : il repose directement sur le socle précambrien au-dessus duquel il forme une cuesta bien visible à partir d'Ejeda ; au signal Vohimiroro, la puissance visible de ce niveau est au minimum de 32 mètres, mais les ondulations du toit du socle déjà signalées la réduisent localement. Les pendages, non mesurables, paraissent très faibles vers l'Ouest, en raison de la largeur de la zone d'affleurement, qui atteint 5 kilomètres au Nord immédiat de la Linta.

(1) BESAIRIE H. et COLLIGNON M., 1956. op.cité.

EOCENE INFÉRIEUR. - Dans la vallée de l'Onilahy, les faunes ont permis de distinguer à la base de l'énorme ensemble calcaire du plateau Mahafaly d'abord des calcaires paléocènes à Pseudolithothamnium, puis des calcaires compacts à Lithothamnium et Milioles rapportés à l'Yprésien. Ces formations sont figurées sur la deuxième édition de la carte au 1/200.000 Tuléar-Betioky, depuis l'Onilahy entre Mahaleotse et Lavainala jusqu'à Iandrambahy au Sud ; il semble bien qu'au delà les affleurements disparaissent au Sud de Santa et que les niveaux de cet âge prennent ensuite un faciès de calcaires gréseux à glauconie très analogue à celui du Sénonien supérieur (signal Vohidolo, Vohibondrona). Faute de pouvoir séparer pratiquement ces niveaux, nous avons donc groupé sur les cartes et les coupes dans cette région Sénonien supérieur et Eocène inférieur (e¹), entre lesquels il ne paraît pas qu'il y ait eu d'ailleurs interruption de la sédimentation. Dans la vallée de la Linta, ces niveaux affleurent jusqu'à Ampitanaka et le confluent Ranomasy-Linta.

EOCENE A ALVÉOLINES. - Nummulites et Alvéolines ont été signalées dans les niveaux précédents, mais elles sont particulièrement abondantes, les secondes en particulier, dans les calcaires lutétiens où elles constituent un bon repère pratique. Ces calcaires, en général compacts, sont en bancs épais, avec quelques lits marneux ; leur puissance totale est supérieure à 100 mètres et ils forment toute la partie Ouest du plateau entre le couloir d'Itombona et l'Onilahy, avec cependant des placages d'Eocène à Huîtres (non signalés sur l'actuelle carte au 1/200.000). Au Sud du couloir, ils affleurent dans la dépression d'Ilempo, en bordure Est du plateau où ils forment un ressaut topographique très net dans la cuesta, dans la vallée de la Linta et de ses affluents. Du côté Ouest du plateau, la falaise est également constituée sur toute sa hauteur par les calcaires à Alvéolines, dont l'affleurement s'élargit dans la Zone des avens, pour disparaître au Sud-Ouest d'Itampolo sous les formations quaternaires. Les bancs supérieurs ne réapparaissent que sur quelques kilomètres au Nord de Bevoalava.

EOCENE A HUITRES. - Ce niveau comprend des calcaires et marnes à Ostrea pelecypion FISCHER. La plus grande importance relative des bancs marneux, l'extrême abondance des Huîtres, qui souvent constituent l'essentiel de certains bancs, des lumachelles à Gastéropodes et Lamellibranches, permettent une identification facile sur le terrain. Dans la région de Tuléar, ainsi qu'en plusieurs points de la région étudiée, il existe à la base des faciès lagunaires à gypse témoignant d'une interruption de la sédimentation.

Limité au Nord à de faibles surfaces entre Soalara et la cuvette d'Ankazomanga, l'Eocène à Huîtres prend un grand développement au Sud du couloir d'Itombona et de la cuvette d'Ilempo et s'étend sur la majeure partie du plateau Mahafaly, soit sur 40 à 50 kilomètres de largeur Est-Ouest, sauf toutefois dans la zone des avens et dans les vallées de la Linta et de ses affluents

En réalité, les calcaires et marnes à Huîtres ne sont pas identifiables sur le plateau, où couches et fossiles sont masqués par une carapace calcaire secondaire très continue, épaisse de 0,50 à 4 mètres, mais on les trouve dans toutes les coupes du pourtour du plateau, aussi bien dans la cuesta orientale que dans la falaise limitant la zone des avens à l'Est. Les contours de la planche IV ont été tracés sur photographies aériennes, d'après les coupes de terrain, en suivant les bancs calcaires visibles parfois de façon continue sur plusieurs dizaines de kilomètres.

MORPHOLOGIE DU PLATEAU CALCAIRE. - L'étude morphologique détaillée du plateau calcaire reste à faire ; bien que les photographies aériennes fournissent de précieux renseignements, il manque d'ailleurs pour cette étude les éléments altimétriques indispensables. On peut, provisoirement, distinguer les unités suivantes :

Un karst tabulaire, qui paraît limité aux affleurements de l'Eocène à Huîtres, occupe toute la partie Sud du plateau ; certains indices tendent à prouver que les formes karstiques sont anciennes et n'évoluent plus sous le climat actuel ; les dolines sont presque toutes remblayées par des argiles ou sables argileux roux et on n'y connaît que très peu d'avens (aven Ankilitsimanjoka, dans la vallée de la Linta, aven au Sud du signal Andrianambohitra en $X=225,2$; $Y=159,2$).

Une région calcaire accidentée, au Nord correspond dans l'ensemble à la zone d'affleurement de l'Eocène à Alvéolines. Elle comporte un réseau hydrographique bien développé (mais actuellement totalement sec) tributaire de l'Onilahy ou du couloir d'Itombona.

La zone des avens, à l'Ouest, correspond à une véritable surface structurale au toit de l'Eocène à Alvéolines. Presque rigoureusement tabulaire, elle comporte un grand nombre d'avens ou gouffres d'effondrement non explorés, ni même atteints pour la plupart, dont les plus importants (une cinquantaine) sont visibles sur photographies aériennes, malgré une végétation très dense ; certaines de ces cavités ont plus de 200 mètres de diamètre ; les plus profondes connues ont une quarantaine de mètres de profondeur.

Un réseau hydrographique ancien relie le karst du Sud à la région accidentée du Nord. La principale de ces vallées, remblayée par des sables roux argileux, débute vers Isatrapaly, passe à Beomby et à la mare Lakanina, à l'Est du signal Andrianambohitra, où elle "reçoit" les vallées de la cuvette d'Ilempo ; elle descend ensuite vers le Nord-Ouest, puis l'Ouest, pour aboutir à la falaise occidentale du plateau, 6 kilomètres au Sud d'Ambilalialika ; le surcreusement de la vallée à la traversée de cette falaise indique nettement un abaissement relatif récent du niveau de base.

Il semble bien que le couloir d'Itombona soit aussi une vallée ancienne du même type, mais avec un remblayage continental assez important pour masquer totalement l'ancien lit et modifier considérablement le profil en long (quasi linéaire maintenant) ; l'épaisseur du recouvrement atteint 28 mètres au moins dans le sondage du PK.67,400. Il n'est pas exclu d'ailleurs que le couloir d'Itombona corresponde aussi à un accident tectonique rectiligne Est-Ouest, quoique cette direction soit peu connue à Madagascar pour les failles. La cuvette d'Ankazomanga, drainée en partie par le couloir d'Itombona, peut également se rattacher à cet ancien réseau hydrographique, ainsi que le couloir Nord-Ouest Sud-Est, débutant au signal Vohitsilory et tributaire de la Linta.

Le réseau hydrographique de la Linta présente au contraire des reliefs fluviaux parfaitement "frais", aussi bien pour le fleuve lui-même où un écoulement temporaire peut d'ailleurs avoir lieu pendant quelques heures après un gros orage, que pour ses affluents : couloir du Sorombe, où on remarque encore de nombreux méandres, vallée de Namahatsomotse, vallée du Ranomasy. Il existe dans ce réseau deux stades nets d'érosion témoignant d'un abaissement relatif du niveau de base : les petits affluents du cours inférieur de la Linta montrent tous une brusque rupture de pente sans relation avec la nature lithologique des terrains et le profil en long de la Linta elle-même présente une convexité vers le haut entre Ampitanaka et la sortie du plateau calcaire (voir planche X). Le même fait apparaît dans le profil en long de la Menarandra, à la traversée du plateau calcaire, dans les gorges d'Erea.

La falaise orientale du plateau est une cote d'érosion où on distingue nettement deux replats structuraux correspondant au sommet des calcaires à Alvéolines et au sommet des calcaires à Huîtres. Localement, il existe une troisième falaise, correspondant soit à des dépôts quaternaires, soit, en particulier au Sud, à des calcaires crayeux dont nous discuterons plus loin l'âge possible.

Au Sud de la Linta, les formations du Néogène continental s'appuient contre la cuesta et fossilisent les replats structuraux ; ceci est particulièrement net depuis le Sud de la Linta (signal Lohapolo) jusqu'à proximité de la Menarandra (signal Vasianisy) : entre ces deux points c'est seulement dans les golfes du plateau (entrée du couloir de Sorombe, golfes de Reambongo et de Belemboka) que l'Eocène affleure sur toute la hauteur de la cuesta. Il n'est pas douteux que le relief actuel était déjà fixé, dans ses grandes lignes, avant la sédimentation continentale néogène.

La falaise de l'Est de la zone des avens, ou falaise de l'Ambohibe, est également une cuesta, cette fois à regard Ouest. Haute de 50 à 80 mètres, elle débute près de l'extrémité Nord du lac Tsimanampetsotsa, s'éloigne jusqu'à 8 kilomètres de la falaise occidentale et se poursuit jusqu'au Sud-Est d'Itampolo, où elle est recouverte par les sables quaternaires. Elle est extrêmement dentelée, avec des buttes-témoins d'Eocène à huîtres isolées sur la surface structurale de la zone des avens.

La falaise occidentale du plateau, presque parfaitement rectiligne, correspond indubitablement à une faille de Soalara à Itampolo (faille de Tuléar). Entre Itampolo et la Menarandra, la falaise est en partie recouverte par le Quaternaire dunaire mais il est extrêmement probable qu'il y a là aussi une faille majeure dans l'Eocène, de direction Nord-Ouest - Sud-Est, à regard Sud-Ouest, dont le rejeu récent explique les anomalies signalées plus haut dans les profils de la Linta et de la Menarandra.

TECTONIQUE DU PLATEAU CALCAIRE - Faille de Tuléar. - La faille qui limite le plateau Mahafaly à l'Ouest, depuis longtemps supposée d'après la forme de la falaise, a été mise en évidence par les études géophysiques et les sondages au pétrole. Un Lutétien marneux, mais bien daté par les foraminifères, a été rencontré à 85 mètres de profondeur au sondage T.U-1 bis au Nord-Est de Tuléar et à 159 m au sondage T.J-1 bis au Nord de la ville, sous les alluvions du Fiherenana, alors que le même niveau se trouve, à l'Est de la falaise, à une cote supérieure à +160 mètres ; compte tenu des pendages, le rejet de la faille en surface est donc de l'ordre de 150 mètres. Nous avons vu, à propos du Crétacé infrabasaltique que, au niveau des basaltes, le rejet de la même faille était supérieur à 1.000 mètres. Il y a donc eu une activité importante de la faille entre le Crétacé supérieur et le Lutétien et il y a tout lieu de supposer que, toutes proportions gardées, cette faille a pu jouer jusqu'à une époque très récente, ce qui expliquerait beaucoup de faits morphologiques.

Faille du plateau. - A l'intérieur du plateau calcaire, aucune faille n'a pu être décelée par les études géologiques ordinaires. Seule la photogéologie montre une série de cassures dont le rejet paraît faible dans la plupart des cas. Les principales se trouvent dans l'Eocène à Huîtres en bordure de la zone des avens ; elles ont soit des directions parallèles à la faille de Tuléar, soit des directions symétriques par rapport au méridien, c'est-à-dire Nord-Nord-Est - Sud-Sud-Ouest. D'autres cassures, moins nombreuses et moins longues, sont Nord - Sud ou Nord-Est - Sud-Ouest.

La seule faille présentant une importance géologique est celle qui limite probablement à l'Est la cuvette d'Ankazomanga (voir planche XIII). Compte tenu du pendage moyen des couches, les calcaires de l'Eocène inférieur devraient en effet réapparaître du côté Ouest de la cuvette, tandis qu'on y trouve des niveaux déjà élevés de l'Eocène à Alvéolines. De direction Nord-Nord-Est - Sud-Sud-Ouest, cette faille doit mettre en contact, sous la carapace sableuse, l'Eocène inférieur du compartiment Est avec les formations continentales, attribuées au Néogène, de la cuvette. Il est d'ailleurs probable que la faille soit antérieure au Néogène et ait précisément favorisé le remblayage continental.

Structure. - Ce que l'on sait actuellement de la structure du plateau calcaire est schématisé par les coupes géologiques n° 1 à 6 (planche III^a). Le seul fait certain est l'abaissement des divers niveaux vers le Sud et le pendage général Ouest. En bordure orientale du plateau, le mur de l'Eocène à Alvéoline se trouve en effet vers 300 m d'altitude à Andremba, 270 m à l'Ouest d'Ejeda (Vohidolo) et disparaît vers 240 m au Sud de la Linta, sous le Néogène. Le long de la falaise occidentale, le même niveau est partout au-dessous de la cote zéro ; il faudrait aussi tenir compte des variations possibles, mais ignorées, de puissance des couches.

Le pendage général moyen vers l'Ouest est de l'ordre de 3 à 5 pour mille, mais il peut exister localement des contre-pendages, en particulier dans la zone des avens où la photogéologie montre des plongements Est près du lac Tsimanampetsotsa, et des directions différentes : des pendages Sud existent dans le Lutétien au Sud-Est du village Bekily (vallée de la Linta), des pendages Sud-Est au Nord du vovo Ranomasy. Un mouvement synclinal à grand rayon de courbure paraît exister, avec un axe de direction Nord-Est - Sud-Ouest, au Nord-Ouest d'une ligne Andranoabo-Itampolo, ligne qui limite peut-être le bassin sédimentaire profond.

Au total, les renseignements précis sont rares ; l'établissement d'une carte structurale de l'Eocène, qui serait du plus grand intérêt pour l'hydrogéologie, est actuellement impossible et exigera un très long travail tant géologique que topographique.

COUPES GEOLOGIQUES. - Parmi les coupes relevées le long de la cuesta orientale du plateau Mahafaly, depuis Beahitse jusqu'au Sud de la Menarandra, nous ne donnons ci-dessous que les plus continues et les plus caractéristiques ; les coordonnées indiquées sont celles du sommet des coupes ; les cotes d'altitude ont été déterminées au baromètre.

Est du signal Vohidolo. - X = 192,2 ; Y = 196,6 ; Z = 295.

Cotes :

- | | |
|---------|--|
| 295 | Sommet du plateau. Sables roux sur carapace calcaire épaisse de 2 mètres. |
| 293-285 | Calcaire lithographique blanc, compact, à dendrites, sans fossiles. |
| 285-279 | Calcaire marneux jaune, à cassure esquilleuse. |
| 279 | Marnes vertes, visibles sur deux mètres. |
| 271-267 | Calcaire blanc, à empreintes brunes de petits lamellibranches. |
| 267-264 | Replat topographique avec éboulis, blocs de grès ferrugineux (Néogène), débris d'oeufs d'Aepyronis, débris de poteries en terre graphitée. |
| 263-257 | Calcaire gréseux brun, vacuolaire, à glauconie, et blocs de grès ferrugineux grossier. |

La limite entre Eocène inférieur et Eocène à Alvéolines est vers 264 mètres. On remarquera la présence sur le replat de 267-264 m de débris d'Aepyornis, prouvant que ce relief existait déjà au Quaternaire ancien. Il est impossible de dire si les débris de poterie correspondent à une industrie humaine ancienne, car ce type de poterie aujourd'hui non employé dans la région, était encore en usage avant l'arrivée des Européens.

Butte-témoin Vohibondrona. - X=180,1 ; Y=197,3 ; Z=215 environ.

- 215-195 Calcaires blancs en gros bancs, pétris d'Alvéolines, avec Nummulites de grande taille, mais moins nombreuses.
- 195 Marnes brunâtres, à nodules calcaires.
- 191 Lumachelle à Lamellibranches et Gastéropodes, avec rares Alvéolines.
- 190 Grès gris en plaquettes, sans fossiles.
- 183 Calcaire gréseux brun, sans fossiles.

L'Eocène à Alvéolines a son mur vers la cote 190 ; il est particulièrement fossilifère ici.

Sud-Ouest d'Itrobeka. - X=140,8 ; Y=202,8 ; Z=249.

- 249 Sommet du plateau. Sables roux et carapace calcaire.
- 248-246 Calcaires gris à taches roses, compacts, à rares empreintes de coquilles indéterminables.
- 246-237 Marnes gris clair.
- 237-230 Calcaires marneux blancs, lités, à altération crayeuse.
- 230-228 Calcaires gris-jaune, à moules de petits Lamellibranches, en gros bancs formant abrupt.
- 228-219 Marnes à huîtres abondantes, avec intercalations de calcaires marneux blancs fissurés et de calcaires jaunes à Lamellibranches.
- 219-218 Calcaire marneux jaune à cassure esquilleuse.
- 218-207 Large replat topographique avec blocs de calcaires compacts roses, dolomitiques et calcaires marneux blancs vacuolaires.
- 207-201 Calcaire compact jaune clair ou beige, à empreintes indéterminées, en gros bancs formant falaise.

Le bas de la coupe, jusqu'à la cote 219 correspond à l'Eocène à Alvéolines; l'Eocène à huîtres comporte une série marneuse riche en huîtres sur une dizaine de mètres, puis une série plus calcaire, à fossiles rares.

Imanda. - X=133,7 ; Y=212,5 ; Z=214.

- 214 Sommet du plateau. Carapace calcaire.
- 213-210 Calcaires marneux blancs, très diaclasés ; altération crayeuse.
- 210-208 Calcaires marneux jaunes.
- 208-201 Marnes verdâtres.
- 201-200 Banc gypseux, puis marnes vertes à huîtres de grande dimension.
- 198 Replat topographique. Calcaires et marnes à huîtres abondantes.
- 195 Banc de calcaire dolomitique jaune.
- 195-177 Calcaires et marnes à nombreuses huîtres ; un banc-repère de calcaire marneux ocre à 186.

L'Eocène à huîtres, incomplet vers le bas, affleure de 177 à 200 mètres ; au-dessus, une série azoïque, marno-calcaire (cartographiée en même temps que l'Eocène à huîtres) débute par un niveau gypseux. Cette série pourrait être beaucoup plus récente (voir Oligocène-Miocène).

Esifake. - X=109,8 ; Y=209,5 ; Z=150.

- 150-148 Carapace calcaire.
- 148-146 Calcaire bréchique.
- 146-142 Calcaires blancs crayeux en petits bancs irréguliers.
- 142-131 Replat topographique ; éboulis.
- 131-128 Calcaire compact gris-beige, vacuolaire, en gros bancs.
- 128-123 Calcaire marneux blanc sans fossiles.
- 123-105 Alternance de lits marneux à grosses huîtres et de bancs de calcaires lithographiques à empreintes. Les marnes prédominent.
- 105-98 Alternance de calcaires et marnes à huîtres ; calcaires prédominants.
- 98-97 Calcaire jaune sans fossiles.
- 97-85 Calcaires marneux et marnes à huîtres avec lumachelles à Gastéropodes et Lamellibranches.

L'Eocène à huîtres est ici certain de la coupe à 123 mètres ; au-dessus, comme dans la coupe précédente, on trouve une série sans fossiles avec également des calcaires blancs crayeux.

Piste Tsialangy Nord. - X=106,7 ; Y=216,2 ; Z=140.

- 140-135 Calcaires bréchiques altérés.
- 135-128 Eboulis avec marnes blanches.
- 128-123 Calcaires marneux jaunes, sans fossiles, avec quelques intercalations marneuses.
- 123-121 Calcaires lithographiques blancs, à rares moules de Lamellibranches.
- 121-118 Marnes vertes.
- 118-117 Banc de calcaire jaune à Lamellibranches.

117-113	Calcaires et marnes à grosses huîtres.
113-99	Calcaires blancs sans fossiles et marno-calcaires beiges.
99-96	Calcaire marneux gris à Lamellibranches.
96-92	Eboulis ; coupe masquée.
92-90	Calcaire blanc, grumeleux, à coquilles d'huîtres.
90-84	Eboulis.
84-79	Calcaire marneux blanc et marnes blanches.
79-73	Lumachelles à Gastéropodes et Lamellibranches. Huîtres de grande taille.
73-70	Eboulis.
70	Grès argileux et ferrugineux grossier (Néogène).

Cette coupe, presque entièrement dans l'Eocène à huîtres, montre une série calcaire, pauvre en huîtres entre deux séries plus marneuses et très riches en coquilles. La partie supérieure de la coupe rappelle, par ses facies, le sommet des deux coupes précédentes.

OLIGOCENE ET MIOCENE. - Oligocène et Miocène marins n'ont jusqu'ici été reconnus qu'en de très rares points ; en suivant l'ordre chronologique des découvertes : des formations à Cyphus arenarius ont été signalées au Cap Sainte Marie et à Faux Cap ; en 1955, de SAINT OURS a identifié des calcaires tendres marneux ou gréseux à la cote 207, 16 kilomètres au Sud-Est de Tuléar ; épais d'une cinquantaine de mètres et renfermant vers leur partie supérieure une faunule à Cyphus arenarius LINNE et divers petits Echinides mal conservés ; enfin, en 1956, le sondage Andavadoaka, très au Nord de la zone étudiée ici, a traversé de 252 à 560 mètres des calcaires marneux détritiques attribués à l'Aquitano-Burdigalien, puis, de 560 à 941 mètres des marnes plastiques vertes, pyriteuses, avec lentilles de calcaires détritiques zoogènes, correspondant à l'Oligocène.

La première question qui se pose est celle de l'âge réel des calcaires et marnes à Ostrea pelecydion, classés jusqu'ici dans l'Eocène, sans grands arguments paléontologiques. Des Foraminifères provenant de cette série ont été récoltés et envoyés il y a quelques années à des spécialistes, mais les déterminations ne nous sont pas parvenues. Sur quelques formes examinées récemment, une détermination provisoire indique un âge miocène (en tous cas très postérieur au Lutétien) ; ces échantillons proviennent des points suivants : source Ranokisoke (X=182,6 ; Y=191,0), signal Lohapolo, 19 mètres au-dessous du sommet (X=165,0 ; Y=208,5), Sud-Est de Sihanamitohy, 7 mètres au-dessous du sommet (X=140,7 ; Y=209,7), piste d'Ambovo, 24 mètres au-dessous du sommet (X=116,1 ; Y=211,6) et les bancs marneux où ont été effectués les prélèvements sont situés, dans trois des cas à moins de 4 mètres au-dessus des derniers bancs à huîtres (d'ailleurs masqués par le Néogène dans le quatrième cas).

L'hypothèse la plus vraisemblable est que la série située immédiatement au-dessus des derniers bancs à huîtres et constituée essentiellement par des marnes puis des calcaires blancs crayeux est d'âge miocène ; puis-qu'il n'apparaît aucune discontinuité de sédimentation entre cette série et les couches à huîtres, alors qu'il en existe une entre le Lutétien à Alvéo-lines et la série à Ostrea Pelecypdion, on peut supposer que celle-ci est d'âge oligocène et non éocène.

La série miocène ainsi définie s'étendrait sur la moitié orientale de la région cartographiée comme "Eocène à huîtres". La vérification de ces hypothèses est importante du point de vue pratique, pour préciser l'extension possible de la nappe aquifère de Beomby-Lovo qui se trouve précisé-ment dans ces niveaux ; elle exigera un lever géologique complet avec échan-tillonnage systématique à tous les niveaux pour recherche et détermination des microfaunes, car, sauf quelques empreintes indéterminables, on n'y connaît pas jusqu'ici de fossiles.

A la base du cap Sainte Marie, la meilleure coupe se trouve dans un ravin en forme de cirque situé en X=59,2 ; Y=268,95, sur le côté Ouest du Cap ; au-dessous de grès saumon à grain fin formant surplomb à l'altitude +15 environ, on relève la coupe suivant, de haut en bas :

puissance

- 1 m Grès argileux tendres, verdâtres, sans fossiles.
- 1,5 m Brèche à ciment argilo-gréseux verdâtre, à éléments arrondis de grès et éléments informes de grès jaune très dur.
- 0,5 m Brèche analogue où les éléments gréseux informes sont très abon-dants.
- 1,5 m Grès argileux verdâtre à éléments de calcaire gréseux blanc.
- 1,5 m Calcaire gréseux blanc s'altérant en blocs informes, plus ou moins arrondis.
- 2 m Calcaire cristallin blanc, à dendrites, très compact, en bancs de l'ordre de 10 cm d'épaisseur. Quelques zones lumachelliques à Lamellibranches. Le sommet de ces calcaires comporte une sur-face oxydée, diaclasée et taraudée, recouverte d'une pellicule concrétionnée. Au-dessus de cette surface se trouvent des ga-lets arrondis de 1 à 10 centimètres de diamètre entourés de couches concentriques d'altération.
- 3 m Calcaire cristallin blanc marbré de rose, compact, en bancs de 30 à 50 centimètres. Nombreuses coquilles de Lamellibranches.
- 1 m Conglomérat à ciment de couleur brique et éléments de calcaire blanc. La partie inférieure de ce niveau est masquée par les sables de plage, environ 3 mètres au-dessus du rivage.

Les calcaires de la base de la coupe, au-dessous de la surface oxy-dée (cote +9), doivent être rapportés à l'Eocène, sans que l'on puisse pré-ciser plus ; compte tenu de la structure générale du plateau mahafaly, on peut penser qu'il s'agit de sa partie supérieure, et c'est ce que nous avons admis sur les coupes et les cartes. Aucun âge ne peut être attribué

aux grès argileux et brèches affleurant sur 6 mètres au-dessus, où nous n'avons trouvé aucun fossile ; il est possible que la découverte ancienne de Cyphus arenarius ait été faite dans une autre coupe actuellement masquée par les éboulis quaternaires.

Au Sud de la coupe décrite, les calcaires éocènes sont recouverts directement par des grès quaternaires saumon à stratification entrecroisée ; leur surface supérieure s'élève jusqu'à +10 m puis s'abaisse progressivement pour disparaître sous la mer, un peu avant l'extrémité Sud-Ouest du Cap. Vers le Nord, les calcaires disparaissent immédiatement au Nord de la coupe, à hauteur d'un ravin correspondant sans doute à une petite faille.

D'autres affleurements calcaires existent au Nord du Cap Sainte Marie, mais n'ont pas été étudiés en détail. Dans le ravin Ampengoka, on les trouve jusqu'à l'altitude +22 et ils sont surmontés par 3 mètres de sables argileux gris foncé. Plus au Nord-Ouest, ils forment une petite falaise continue à la base de la grande falaise quaternaire, jusque près du vovo Ambatomitsotaka, où on ne trouve plus que des blocs de calcaire compact rosé ; les déblais du puits Ikatro contiennent également des calcaires durs.

A l'Est du Cap Sainte-Marie, il n'existe en bordure du rivage aucun affleurement connu pouvant correspondre à des formations marines anciennes et nous ignorons la provenance de la découverte signalée à Faux-Cap.

Dans le sondage Ankitry (X=91,2 ; Y=339,3), 10 kilomètres au Sud d'Ambondro, à 7,5 kilomètres de la mer, des formations marines ont été trouvées entre les cotes -27 et -56. La coupe, dressée d'après les cuttings seulement, est la suivante (AUROUZE, 1958-j) (voir planche V) :

profondeur	
120,5 -127,0	Bancs alternés de dolomie blanche, légèrement gréseuse, compacte et de dolomie beige finement vacuolaire, avec minces niveaux de marne plastique violette. Débris et moules de Lamellibranches.
127,0 -129,8	Argile vert clair, plastique, peu sableuse.
129,8 -132,5	Sable moyen (1 à 2 mm), mal roulé.
132,5 -137,25	Alternance de sables, argiles et marnes sableuses ; minces lits de dolomie (argiles et marnes prédominant).
137-25-148,8	Alternance de sables moyens à grossiers peu roulés, de marnes violettes, d'argiles vertes et brunes, de bancs de dolomie blanche et de dolomie rose à dendrites (sables et dolomies prédominant).

Cette série est intercalée entre le socle précambrien et des sables grossiers bien roulés correspondant sans doute à des dépôts littoraux du Quaternaire ancien ou du Pliocène ; il est donc impossible de préciser son âge, mais il n'est pas absurde d'y voir un équivalent marin du Néogène continental, qui n'existe pas dans ce sondage.

EXTENSION DU SEDIMENTAIRE SENONIEN ET TERTIAIRE. - Le problème de l'extension actuelle des formations marines sénoniennes et tertiaires (tout problème paléogéographique étant exclu) est extrêmement important du point de vue hydrogéologique. La plupart de ces formations présentent en effet une perméabilité par fissures et la pente hydraulique des nappes aquifères éventuelles doit y être très faible ; elles comportent en outre des niveaux marneux qui peuvent constituer le substratum de nappes suspendues ou le toit imperméable de nappes artésiennes. Les données du problème sont malheureusement extrêmement rares et, dans la région Sud en particulier, on ne peut tracer que des limites très hypothétiques (planche IV) qui ont pour seul mérite d'être actuellement les plus vraisemblables.

Le sondage de Tuléar (Tj.1bis) déjà cité donne, à l'Ouest de la faille de Tuléar, la coupe suivante :

profondeur

- 159 -300 Marnes vertes glauconieuses, irrégulièrement sableuses, très zoogènes (Lutétien).
- 300 -963 Marnes gris vert et grises, plastiques ou peu indurées, irrégulièrement sableuses et micacées, avec nombreuses et très fines intercalations de calcaires marneux gris clair. Mouches de glauconie et de pyrite (Eocène inférieur).
- 963 -1263 Marnes gris foncé très homogènes, finement micacées, à teneur en carbonates assez faible. Rares passages grésos-sableux. Débris de tests d'Inocérames très fréquents (Maëstrichtien).
- 1263 -2046 Marnes gris foncé, finement sableuses et micacées, plus ou moins indurées. Quelques nodules d'un calcaire brun foncé. Glauconie souvent altérée (Sénonien indifférencié).
- 2046-2108 Basaltes.

Il est à peu près certain, d'après ce sondage, que la plupart des formations sédimentaires s'étendent vers l'Ouest sous la totalité du plateau Mahafaly, mais qu'à la hauteur du rivage, elles ont un caractère franchement marneux et subsident. Nous avons vu à propos du Crétacé infra-basaltique que cette subsidence devait être moins marquée à l'Est de la faille, où les basaltes seraient vers 800-900 mètres. On peut penser que le même régime subsident se poursuit vers le Sud, le long de la côte, jusque vers Itampolo, mais on ne peut rien dire sur la position de la zone de changement de facies, des calcaires à l'Est, aux marnes à l'Ouest.

Dans la région Sud, le sondage Ankenta, au Sud-Ouest d'Ampanihy et à moins de 3 kilomètres du rebord oriental du plateau de Ranomasy (X=134,9 ; Y=214,7 ; Z=155), effectué fin 1958, a touché le socle précambrien à la cote +46, mais il a été conduit sans contrôle géologique et aucune coupe précise n'a été établie. Les hypothèses faites ci-dessous et sur la carte sont donc seulement fondées sur les affleurements et en supposant que les différents niveaux sont successivement transgressifs vers le Sud.

Sénonien supérieur - Eocène inférieur. - Nous admettrons que l'extension de ces deux séries est assez semblable ; on les connaît en affleurements jusqu'à l'îlot cristallin du Sud de la Linta et nous pensons qu'elles se prolongent sous le Néogène continental et sur le socle précambrien jusqu'à la côte, à hauteur de la faille de Kokomba (Nord-Ouest de Lavanono).

L'Eocène à Alvéolines est connu au Sud jusqu'à proximité de la Menarandra, dans la falaise Sud-Ouest, jusqu'au Sud du Couloir de Sorombe du côté Est ; sa cuesta orientale est en grande partie fossilisée sous le Néogène continental et il est probable que ce relief existe aussi plus au Sud où nous avons dessiné dans la limite d'extension des rentrants correspondant aux grandes vallées. On peut prévoir l'Eocène à Alvéolines dans toute la partie Ouest du plateau Karimbola, jusqu'au Nord des affleurements précambriens de Lavanono.

L' "Eocène" à huîtres est identifié jusqu'à l'extrémité Sud des affleurements calcaires, à l'Est de la Menarandra, où il disparaît sous les grès quaternaires. Jusqu'en ce point, la limite d'extension actuelle suit de très près celle des affleurements, car le Néogène continental s'appuie partout contre la cuesta ; plus loin, cette limite traverse le plateau Karimbola pour aboutir à la côte, entre le Cap Sainte-Marie et Faux-Cap, englobant ainsi les affleurements du Cap Sainte-Marie ; l'îlot cristallin de Lavanono perce évidemment cette zone d'extension. On ne peut naturellement rien dire de l'étendue des formations marines du sondage d'Ankitry qui sont connues en ce seul point.

NEOGENE CONTINENTAL

La dénomination très générale de Néogène continental s'applique à l'ensemble des formations non marines et certainement post-Eocène, mais antérieures à l'apparition d'Aepyornis, qui affleurent soit dans les cuvettes du plateau calcaire Mahafaly (cuvette d'Ankazomanga), soit entre le plateau calcaire et le socle cristallin (régions d'Andranoabo et d'Ampanihy), soit encore dans les golfes formés par le toit du socle précambrien (bassins de Beloha et d'Ambovombe). Il faut préciser dès maintenant que cette série n'a jusqu'ici fourni aucun fossile.

CUVETTE D'ANKAZOMANGA. - Située entre 20 et 30 kilomètres à l'Ouest de Be-tioky, la cuvette d'Ankazomanga se trouve entre le plateau de l'Ianakatsamby à l'Est (Eocène inférieur) et la région calcaire accidentée de l'Ouest, correspondant à l'Eocène à Alvéolines. Plutôt que d'une cuvette, il s'agit d'ailleurs d'un vaste glacis incliné du Nord-Ouest vers le Nord-Est et le

Sud-Est où il aboutit à des thalwegs tributaires de l'Onilahy au Nord, du couloir d'Itombona au Sud (voir planche XIII).

En surface, l'ensemble de la cuvette est recouvert par des sables argileux roux assez grossiers, avec de petites dépressions argileuses formant mares. C'est seulement dans les déblais des puits et dans le thalweg Nord-Ouest que l'on peut reconnaître la nature du sous-sol. A Ankazomanga, on trouve des grès argileux grossiers et des grès ferrugineux ; au vovo de Tokoindolo, des grès argileux grossiers gris sous 1,7 m de sables roux, au vovo Andranomanenty des grès analogues. En 1915, REYNIER signalait que les sables argileux deviennent de plus en plus compacts en profondeur à Ankazomanga et reposent sur du calcaire (mais sans indiquer la profondeur). Des sondages pour prospection sismique ont été effectués en 1956 dans la région, mais nous n'en avons pas de coupes. C'est dire que les données sont rares sur la nature et l'épaisseur des formations continentales remblayant la cuvette.

Il est très probable que la cuvette d'Ankazomanga corresponde à un compartiment abaissé à l'Ouest d'une faille de direction Nord-Nord-Ouest Sud-Sud-Est et, si l'on admet la structure schématisée par la coupe n°1, planche III^a, la puissance des formations néogènes pourrait atteindre 60 mètres à l'Est et au centre pour diminuer aux abords des affleurements de l'Eocène à Alvéolines sur lequel elles reposent normalement.

COULOIR D'ITOMBONA. - En aval d'Ankazomateila, le couloir d'Itombona ne montre en surface que des sables roux argileux, jusqu'à son débouché dans la plaine côtière, à Ambilalialika (PK.35 de la voie ferrée Sakoa-Mozambique). Cinq sondages ont été effectués en 1944, pour recherches d'eau, et montrent que le remblayage continental est très irrégulier, en fonction probablement de la position de l'ancien lit du fleuve. Au village Itombona (sondage n°11), il comprend seulement des sables roux plus ou moins compacts sur 12,6 mètres, avec une carapace ferrugineuse entre 4 et 5 mètres de profondeur. Au PK.67,9 (n°7), on trouve sous les sables roux, entre 11 et 16 mètres une alternance de sables et d'argiles au-dessus des calcaires éocènes. Dans le sondage du PK.66,3 (n°8) les sables roux, épais seulement de 3 mètres, reposent sur les calcaires, tandis qu'au PK.67,4 (n°6), 1.100 mètres plus à l'Est, le substratum éocène n'a pas été atteint à 28 mètres sous 17 mètres de sables argileux roux et 11 mètres de sables peu cimentés. A l'extrémité Ouest du couloir, le remblayage continental est épais de 15 mètres avec une couche argileuse à partir de 4 mètres. En résumé, pour ce qu'on en connaît, le Néogène continental est essentiellement sableux et argileux, avec de grandes variations de puissance.

REGION D'ANDRANOABO. - Entre le parallèle d'Ambatry et celui de Beahitse, soit sur 35 kilomètres environ, affleure une série continentale, limitée vers l'Ouest par les calcaires éocènes et reposant à l'Est successivement, du Nord au Sud, sur le Crétacé supérieur, sur le Karroo et sur le socle précambrien ; cette formation a été définie en 1946 par H. BESAIRIE sous le nom de série d'Andranoabo. Elle est relativement bien connue, car les affleurements en sont nombreux, en particulier dans la falaise dominant la dépression de la Sakamena, et plusieurs sondages de recherche d'eau fournissent des coupes détaillées.

Dans les affleurements, la série est constituée essentiellement par des grès siliceux, des grès argileux et des argiles de teintes variées, le tout en lits de puissances très variables, alternant irrégulièrement. On remarque en certains points vers le sommet de la série des grès ferrugineux abondants, perçant parfois, à l'intérieur du plateau, la couverture de sables roux (buttes d'Andakara, Ouest du signal Itsakopa). Lorsque cette série repose directement sur le Karroo, où l'on trouve des roches assez semblables, la limite inférieure est difficile à préciser ; la puissance moyenne est de l'ordre de 50 mètres et peut atteindre 80 mètres en quelques points.

Sur le Karroo et sur le socle cristallin, il existe des affleurements isolés de la Série d'Andranoabo ; ce sont les buttes-témoins de Vohibazaha et d'Eliva dont les sommets tabulaires font partie de la même surface pénéplanée que le plateau principal et, sur le précambrien, des placages de grès argileux bariolés, fissurés, à lentilles d'argile, en particulier à l'Ouest de Beatravy.

Les sondages de recherche d'eau ont rencontré les mêmes formations sablo-argileuses et argileuses. En général, les couches sont de faible puissance, sauf à Ambatomainty où on remarque une couche argileuse de 9 mètres de puissance à la base de la série. A titre d'exemple, nous donnons ci-dessous la coupe d'une recherche par puits effectuée en 1948 au Nord-Est de Santa (X=227,4 ; Y=193,1), où les variations verticales sont particulièrement rapides :

puissance

- 2,7 m Sable très argileux, très compact, jaune foncé.
- 0,7 Terrain compact brun avec morceaux de grès.
- 1,8 Sable jaune argileux.
- 3,9 Argile violet mauve.
- 1,6 Sable argileux mauve.
- 0,9 Sable argileux ocre-rouge.
- 0,7 Argile grise.
- 2,1 Argile mauve.
- 0,8 Sable blanc argileux très fin.
- 2,3 Sable jaune fin et sable jaune clair assez gros.
- 3,1 Sable blanc assez grossier.

1,2 m	Sable grenat fin.
2,4	Sable jaune clair, très fin, argileux.
3,6	Sable jaune foncé à gros grains.
0,9	Argile blanche.
1,9	Argile ocre-rouge.
0,5	Sable blanchâtre.
0,4	Sable argileux mauve.
0,4	Sable blanc.
0,1	Sable violet.

Le puits, arrêté à 32 mètres de profondeur, n'a pas atteint la base de la série d'Andranoabo (Anonyme, 1949).

Il est bien évident que, dans des formations de ce type, il serait illusoire de chercher à établir une quelconque stratigraphie, et, à fortiori, des cartes structurales ; du point de vue tectonique, cependant, il apparaît au moins une cassure de direction Ouest-Nord-Ouest Est-Sud-Est sur 4 kilomètres environ, passant par Ambatomainty.

REGION SUD-OUEST D'AMPANIHY. - Entre le glacis du socle précambrien au Nord-Est et la cuesta orientale du plateau calcaire Mahafaly au Sud-Ouest, depuis l'extrémité Sud des affleurements du Crétacé supérieur jusqu'à la Menarandra, l'ensemble de la région Sud-Ouest d'Ampanihy est constitué par des formations continentales tout-à-fait comparables à la série d'Andranoabo. Du point de vue morphologique, cette région est un plateau culminant vers 280 mètres d'altitude dans sa zone centrale (mare Erihitry), séparé du plateau calcaire par des dépressions allongées : dépression d'Itrobeka à l'Ouest, tributaire du couloir de Sorombe, dépression d'Ankenta au Sud-Ouest, tributaire de la Menarandra ; vers le Nord, la limite entre Néogène et cristallin est peu précise, tandis que vers l'Est le plateau est entamé en falaise par l'érosion des affluents de la Sakatovo, d'où une série d'affleurements bien dégagés ; signalons pour son relief chaotique la haute vallée du ruisseau Tsiombinaomby.

Partout où le contact cristallin-Néogène a pu être observé, on remarque à la base une couche argileuse, en général blanche, épaisse de 2 à 5 mètres, puis des grès grossiers à grains mal roulés et ciment argileux, de teinte blanche ou rosée, très irrégulièrement stratifiés, qui paraissent constituer l'essentiel de la série, avec des lentilles argileuses ; vers le sommet, les grès deviennent nettement ferrugineux et plus compacts ; ils restent en relief dans les zones érodées et forment quelques buttes au milieu de la carapace sableuse dans les zones tabulaires (Besavoa et Nord-Ouest de Masiadolo).

Les rapports des calcaires éocènes et du Néogène continental ont été étudiés en détail dans cette région, car, en raison de la topographie, avec la cuesta calcaire dominant nettement le plateau gréseux, on pouvait songer à des formations continentales ante-éocènes (crétacées par exemple). On constate que l'altitude du sommet des formations continentales dans la cuesta est très irrégulière et parfaitement indépendante de la stratigraphie de l'Eocène ; il s'agit donc bien de formations postérieures accolées à une falaise préexistante à leur dépôt. Dans les rentants de la falaise provenant d'une érosion récente, les formations néogènes ont été déblayées et les replats structuraux de la cuesta réapparaissent (entrée du couloir de Sorombe, Sud-Ouest d'Antsanira, avec des buttes-témoins néogènes en avant de la côte, Sud-Ouest de Reambongo, golfe de Belemboka au Nord-Ouest de Marolinta). Ceci est particulièrement bien visible sur les photographies aériennes.

Du point de vue pétrographique, la constitution du Néogène continental aux abords du plateau Mahafaly n'est guère différente de ce qu'elle est à l'Est : signal Vasianisy, on relève la coupe suivante : (de haut en bas)

puissance

- 17 m Eboulis calcaires et marneux éocènes avec quelques blocs de grès ferrugineux et des sables rosés.
- 4 m Grès blancs argileux à stratification irrégulière avec lentilles d'argile blanche indurée et d'argile violette en plaquettes. La surface supérieure de ce niveau qui forme un replat topographique large d'une dizaine de mètres est rubéfiée, avec des concrétions limonitiques, des galets patinés, quelques débris d'oeufs d'Aepyornis.
- 9 m Grès ferrugineux violacés et argiles schisteuses violettes.

Les sondages effectués dans cette région ne sont guère instructifs du point de vue géologique ; comme aux affleurements on relève des grès argileux, sables argileux et argiles, dont la base n'a pas été touchée à 55 mètres de profondeur au sondage Andavaposa II. Le socle cristallin, très kaolinisé, a été touché à 20 mètres au sondage Teranombitelo en limite Est du plateau.

BASSIN DE BELOHA. - Le plateau néogène du bassin de Beloha est limité à l'Ouest par l'éperon cristallin du Kokomba, à l'Est par celui de Tsihombe. Du côté Menarandra, il existe une petite falaise néogène au-dessus du Précambrien, depuis Lovkarivo, sur la Menarandra, jusqu'aux environs de Maromaso ; un rebord analogue, de moins de 10 mètres de hauteur, entoure au Nord le plateau de Lovokarefo ; du côté Manambovo, le contact est au contraire très diffus, avec des placages éluviaux s'étendant jusqu'à l'Est du fleuve. Vers le Sud et sauf à l'Ouest où il y a une cuesta des calcaires éocènes comparable à celle de la région d'Ampanihy, le Néogène est recouvert par les formations dunaires quaternaires. Il est d'ailleurs à peu près

impossible dans cette zone de différencier le Néogène des terrains argilo-sableux pouvant correspondre à un Quaternaire lacustre ou fluvial (région de Beloha).

En relation avec la profondeur du toit du socle, on peut distinguer les zones suivantes :

Région Nord et Ouest. - Le socle est ici très peu profond et les terrains que l'on peut attribuer au Néogène sont pratiquement réduits aux sables roux superficiels et à des arènes gneissiques. Dans les sondages du plateau de Lovokarefo, la puissance totale n'atteint pas 5 mètres (il faut toutefois remarquer que ces forages ont été effectués dans des dépressions). Les sondages de Tsimilofo, Andranolava, Ankilibehara, Antsira ont également atteint presque immédiatement le Précambrien. A Ambaro seulement on trouve au-dessus des arènes 6 mètres d'argiles phylliteuses et 9 mètres de carapace ferrugineuse au-dessous de 2,5 mètres de sables superficiels ; cette dernière coupe est tout-à-fait comparable aux affleurements visibles dans le rebord du plateau, aux environs de Kokomba.

Région Est. - Au-dessus de la dépression du toit du socle signalée à l'Ouest du Manambovo, on ne voit en surface que des sables roux qui paraissent épais et le glacis oriental du plateau ne fournit aucune coupe véritable. Seuls les deux sondages Famatalefo et Beantsiva, dont les logs figurent planche V, donnent des indications. A Famatalefo, la série est grés-argileuse sur 50 mètres, puis argileuse ; le forage a été arrêté dans ces argiles à 63,8 m. A Beantsiva, sous des sables roux atteignant près de 7 mètres d'épaisseur, on trouve également des grès grossiers blancs à ciment argileux et des argiles gréseuses jusqu'à 36 mètres, avec intercalation d'un calcaire à éléments siliceux correspondant à une carapace ancienne.

Région méridionale. - En bordure Nord du plateau Karimbola, suivant une ligne Ampotaka-Tsihombe, la constitution du Néogène continental est connue par huit sondages. A l'Ouest de Beloha, le socle cristallin n'a été atteint ni à Kerimosa (60 m), ni à Kilimiary (62 m) ; le Néogène est presque entièrement sableux et relativement peu argileux à Kerimosa, gréseux puis argileux à Kilimiary. Les forages de la région de Beloha (Bevaro, Beloha, Masina, Isampaiza) montrent au sommet une première série de sables argileux épaisse de 14 à 27 mètres, supportant, à Beloha et Masina, des argiles sableuses formant le mur de la petite nappe des sables blancs de Beloha et reposant sur un mince niveau de grès argileux très grossiers, puis une seconde série grés-argileuse en général rouge, avec des carapaces ferrugineuses (Bevaro) ou calcaires (Isampaiza) ; la base du Néogène n'a pas été atteinte à Isampaiza (66 mètres) et il est très douteux que le socle ait été touché à Bevaro et Beloha, où les coupes du sondeur mentionnent un "roc cristallin" qui ne peut correspondre qu'à des grès plus compacts ou à des cherts siliceux, aucun échantillon n'ayant été fourni.

A l'Est de Beloha, le sondage Ambolotsifa a traversé des grès argileux grossiers jusqu'à 28,5 m puis des argiles reposant à 52 mètres sur le socle précambrien ; à Montovositra, la série est entièrement sablo-argileuse au-dessous de sables blancs superficiels et son mur n'a pas été atteint à 60 mètres de profondeur.

En résumé, le Néogène continental est surtout constitué, dans cette région méridionale, par des grès argileux plus ou moins cimentés, en général de teinte claire, et l'épaisseur de la série peut être supérieure à 66 mètres.

Région côtière. - L'existence du Néogène continental à la base de la falaise méridionale du plateau Karimbola a été reconnue en 1956 par R. BATTISTINI, mais nous ne sommes pas entièrement d'accord avec cet auteur sur la continuité des affleurements ; dans la portion de la falaise comprise entre Soamanitsa et Betaimbola les grès à ciment calcaire du Quaternaire affleurent partout sauf au Nord de Lavanono où on relève les coupes suivantes :

Sentier Lavanono-Anananadimby

- cote 94 Sable argileux verdâtre avec blocs de grès argileux gris, à grain fin.
- cote 81 à 79 Grès argileux gris, à grain fin.
- cote 79 à 76 Marnes à graviers de quartz, avec débris de grès ferrugineux.

Flanc Est du thalweg Vohibovo

- cote 82 à 80 Grès argileux gris, grossiers et blocs de chert siliceux noir.
- cote 78 Chert siliceux.
- cote 68 Grès ferrugineux.

Ces affleurements sont situés à proximité immédiate de la faille de Lavanono, dans le compartiment surélevé ; nous n'avons pas étudié la région plus à l'Ouest où, suivant BATTISTINI, la presque totalité de la falaise serait constituée par ces terrains, à 2 kilomètres à l'Ouest de Betaimbola.

A Lavanono même, en bord de mer, on voit, au Nord des affleurements basaltiques, des argiles grises et violettes, jusqu'à la faille, au-dessous de formations littorales quaternaires à galets de basalte. La puissance visible de cette couche ne dépasse pas 2 mètres.

Les deux sondages de Lavanono II, au Nord du village, et de Betindria, à l'Ouest du village, ont rencontré des niveaux argileux et marneux sous des sables calcaires certainement quaternaires ; la série argileuse atteint 23 mètres à Betindria et n'a pas été entièrement traversée.

Au total, puisque les formations continentales affleurent à la fois en quelques points de la falaise et sur le rivage, on peut admettre qu'elles soient continues et masquées par les éboulis et par les formations superficielles du glacis de Lavanono, mais nous ne disposons là pour les dater que des niveaux superposés quaternaires et il n'est pas exclu qu'il s'agisse non de Néogène mais d'un Quaternaire ancien.

Extension du Néogène sous le Quaternaire. - Dans la vallée de la Menarandra, au Sud-Ouest, le Néogène continental ne dépasse pas, sous les alluvions, une ligne Beantsiva-Ankilibetsifotsy, 5 kilomètres en aval de Marolinta. Plus à l'Ouest, les grès argileux et ferrugineux sont accolés à la falaise de l'Eocène, comme dans la région Sud-Ouest d'Ampanihy, et ce n'est qu'à partir du méridien 227 que se pose la question de l'extension vers le Sud du Néogène sous le Quaternaire, car on voit là les formations continentales "déborder" la cuesta calcaire, sous les grès dunaires. Sur le sentier allant de Sihanakamba à Tsivokony ($X=104,7$; $Y=227$) on relève la coupe suivante : (de haut en bas)

puissance

- 1 m Sables roux du plateau.
- 2 m Carapace calcaire.
- 5 m environ - Grès tendres à ciment calcaire, à débris d'oeufs d'Aepyornis, blancs.
- 3 m Grès tendres à ciment calcaire, roses.
- 2 m Eboulis masquant les affleurements.
- 3 m Grès grossiers à ciment argileux, gris vert, peu cohérents.
- 3 m Carapace calcaire très compacte, formant replat topographique, avec galets de jaspé et de grès ferrugineux à la surface.

Cette carapace repose sur des calcaires éocènes formant une seconde falaise, très ravinée, au Nord de la falaise des grès quaternaires, et contre laquelle sont accolés des grès ferrugineux violacés et des grès argileux blancs très grossiers qui remplissent aussi la dépression de Lavanono, au Sud du sommet Saronandry (butte-témoin éocène).

Il y a dans cette coupe au moins 3 mètres de grès argileux verdâtres intercalés entre l'Eocène et le Quaternaire ; celui-ci recouvre entièrement la cuesta éocène à l'Est du méridien 230 et masque en même temps le Néogène possible. A défaut de sondages, on est amené à tracer une limite hypothétique joignant cette coupe à la mer dans la région de Tsivaha (planche IV).

Du côté Sud-Est du bassin, entre les derniers affleurements de l'Ouest de Tsihombe et les argiles de la région de Lavanono, le tracé d'une limite d'extension est encore plus hasardeux. Nous avons admis qu'il n'existait pas de Néogène au Sud de l'éperon de Tsihombe car, aux affleurements, le Quaternaire repose directement sur le socle, mais ceci est un bien faible

argument. Pour l'ensemble du plateau Karimbola, il n'est pas prouvé, d'ailleurs, que le Néogène forme une couche continue sous le Quaternaire.

BASSIN D'AMBOVOMBE. - Il existe une différence, à notre avis fondamentale, entre le bassin d'Ambovombe et les régions néogènes étudiées jusqu'ici : alors que celles-ci sont topographiquement, au moins dans leurs parties internes, plus élevées que la pénéplaine cristalline, ou à un niveau peu différent, le bassin d'Ambovombe est aussi une dépression topographique par rapport à son pourtour cristallin ; il est dominé au Nord par les sommets du massif volcanique de l'Androy, à l'Ouest par les inselbergen de l'éperon de Tsihombe, à l'Est par les hauteurs de la rive gauche du Mandrara. La présence de ces reliefs et les fortes pentes ont donné lieu, au Néogène, à une sédimentation en général à la fois plus grossière et plus hétérogène. La description par régions doit se faire ici non en fonction de la profondeur du socle, mais par rapport à la distance aux reliefs cristallins ayant fourni les matériaux des sédiments continentaux.

Région Nord-Ouest (Antanimora-Ambaliandro). - Les affleurements sont dans cette zone pratiquement sans intérêt, car il est impossible d'y distinguer les formations continentales anciennes des éluvions actuelles et des alluvions anciennes plus ou moins évoluées de la rivière d'Antanimora, qui se sont épandues largement dans toute cette région. Une douzaine de forages donnent les indications suivantes :

A proximité immédiate des affleurements du socle, les sédiments continentaux sont peu épais, et probablement en majeure partie quaternaires. Au-dessus du Précambrien, on trouve 4,50 mètres de sables puis 4 mètres d'argiles sableuses à l'Est du PK.328,5, correspondant aux alluvions anciennes de l'Antanimora ; les gneiss affleurent dans la rivière près du sondage. A Imangoro, sur le glacis Est, il y a seulement 6 mètres de sables légèrement argileux ; à Ambatolahy (voir coupe planche V) et à Sakaomby, la série atteint plus de 20 mètres et comporte à la base un conglomérat à galets cristallins ou volcaniques.

Le bassin sédimentaire s'approfondit vers l'aval, où aucun forage n'a atteint le socle (les indications données par les sondeurs se sont, après examen des carottes, révélées erronées). Les logs des sondages Manavy Nord (36 m), PK.349,2 (50,7 m), Laparoy (65,8) figurent planche V. Sables argileux, grès, argiles et marnes constituent toujours l'essentiel du Néogène, mais on remarque la fréquence des carapaces fossiles (carapaces calcaires, siliceuses ou ferrugineuses), l'abondance des graviers et galets de cristallin, la rapidité des variations lithologiques, aussi bien verticalement que latéralement ; entre les sondages très rapprochés d'Ambaliandro I, II, III et PK.349,2, il est pratiquement impossible d'établir des corrélations précises.

Région Nord-Est. - Dans le seul sondage effectué dans cette région (Ankatrafay), les formations continentales atteignent le maximum de puissance connu (95 mètres) ; la coupe (planche V) montre en surface, 7,5 m des sables roux grossiers éluviaux, puis une série extrêmement hétérogène de sables argileux, argiles, marnes, avec quelques bancs calcaires, contenant à presque tous les niveaux des galets de toute taille de quartz, jaspe, rhyolites et, plus rarement, basaltes ; à la base, sur 7 mètres, il s'agit d'un véritable conglomérat cimenté par des grès argileux, qu'une très mince couche d'argile plastique ocre sépare des laves trachytiques elles-mêmes altérées au sommet.

Un fait curieux est l'abondance des galets de quartz alors que le bassin versant est entièrement constitué par des coulées volcaniques ; on peut se demander s'il n'existait pas au Néogène une communication entre le Mandrare et la cuvette d'Ampamolora, à l'emplacement approximatif du seuil actuel d'Etoly, permettant le transport des galets du socle précambrien, à partir du haut Mandrare. Cette vallée aurait été comblée ensuite par les formations néogènes elles-mêmes venant du Nord-Est, et par les dunes quaternaires du plateau de Beanantara, venant du Sud-Est. Cette hypothèse a, en outre, un intérêt hydrogéologique.

Sous les sables de Beanantara, le Néogène continental forme un plateau dont on ne voit au Nord-Est que le rebord, avec une falaise d'une vingtaine de mètres au Sud d'Ankatrafay ; les affleurements montrent là aussi plusieurs niveaux conglomératiques séparés par des couches argilo-gréseuses. Vers le Sud-Est, cette falaise est rapidement recouverte par le Quaternaire dunaire.

Région Sud-Est. - Sur la rive gauche du Mandrare, reposant directement sur le socle précambrien, le Néogène forme des plateaux assez étendus dans les régions de Behara et d'Amboasary. A l'Est immédiat de cette localité, l'ancienne route de Fort-Dauphin montre la coupe suivante : (de haut en bas)

puissance

10 m environ	Conglomérat rubéfié, à gros galets de jaspe et basalte et passées gréseuses blanches.
12 m -	Grès grossier arkosique, à ciment argileux, à grains non roulés. Une lentille de conglomérat.
5 m	Argile sableuse vert clair.
0,2 m	Chert siliceux gris clair.
1 m	Argile rouge.
0,5 m	Chert siliceux.
2 m visibles	Argiles bariolées, un peu sableuses.

Le conglomérat du sommet de la coupe se suit très bien le long de la falaise jusqu'à la route du lac Anony ; il repose directement

sur le cristallin sur la route de Fort-Dauphin, un peu avant la bifurcation vers Behara.

Sur la rive droite du Mandrare, on ne voit au-dessus des alluvions récentes du Mandrare que des sables blancs avec carapaces calcaires, certainement quaternaires, de la cote 25 au sommet du plateau de Sampona. On trouve seulement plus au Nord, mais au niveau des alluvions, près de Berenty, des galets de jaspe et rhyolite immédiatement au-dessous des sables dunaires. On doit conclure soit qu'il existe une faille de direction Nord-Ouest Sud-Est abaissant le Néogène sur la rive droite du Mandrare (ARCHAMBAULT, 1956) soit que celui-ci est totalement masqué par le Quaternaire. L'hypothèse suivant laquelle les conglomérats de la rive gauche correspondraient seulement à une ancienne terrasse du Mandrare ne nous semble pas à retenir car le plateau qu'ils forment se relie aux affleurements de la région Nord de Behara, pour lesquels on ne peut envisager une origine fluviale récente.

Région Sud-Ouest. - Les seuls affleurements du Néogène continental connus dans cette région se trouvent à l'Ouest de la rivière Sakatomily, près de la route Ambondro-Tsihombe. Des gneiss à graphite affleurent dans la rivière et on voit au-dessus des grès argileux verdâtres qui forment les collines du signal Tsimila, à l'embranchement de la piste vers le lac d'Ihodo.

Deux sondages ont été effectués, à quelques mètres de distance, à Tsianoha ; dans le premier, la coupe schématique est la suivante :

profondeur

0 - 38 m	Sables argileux.
38 - 47 m	Sables grossiers, à grains peu roulés, rouge brique.
47 - 70 m	Alternance de marnes grises sableuses et de sables peu argileux, grossiers à la base.
70 - 85 m	Argile rouge sableuse avec une intercalation de sables jaune clair.
85 - 89,3m	Conglomérat à ciment argileux et galets de quartz.
89,3 - 100m	Granite altéré.

Dans le second sondage, on retrouve bien les mêmes formations, mais à des profondeurs légèrement différentes et avec des intercalations sableuses beaucoup moins importantes. Le cristallin sain se trouve dès 86,5 m de profondeur et les corrélations de détail sont pratiquement impossibles entre les deux forages distants seulement de 12 mètres.

Quelques kilomètres à l'Ouest, le sondage Imongy a traversé sur 70 mètres, sans atteindre le socle, une série continentale analogue, avec des

sables argileux sur 37 mètres et des argiles rouges de 42 à 70 mètres, séparés par une carapace calcaire. Il n'est pas impossible que le premier niveau corresponde au Quaternaire.

En résumé, les facies du Néogène continental dans cette région plus éloignée des reliefs du socle sont nettement plus "fins", sableux ou argileux, avec seulement un petit conglomérat à la base, et se rapprochent des facies observés dans le bassin de Beloha et la région d'Ampanihy.

Région centrale et méridionale.— Les terrains quaternaires affleurent partout au centre et au Sud du bassin où le Néogène n'est connu qu'en sondages. A Erada (planche V), 15 kilomètres au Nord-Ouest d'Ambondro, les sédiments que l'on peut rapporter, avec doute, au Néogène continental ont seulement une trentaine de mètres de puissance, dont 14 mètres de sables très argileux gris moyens, à grains mal roulés, 2 mètres de marnes grises et carapace calcaire, 14 mètres d'arène quartzo-feldspathique reposant sur le socle précambrien à 114 mètres. A Ampamolora, au centre de la cuvette, le sondage a traversé sur 59 mètres des marnes, sables argileux et argiles, avec une épaisse carapace calcaire entre 40 et 49 mètres, mais le substratum de cette série n'étant pas connu, on ne peut affirmer s'il s'agit de Néogène ou d'un Quaternaire lacustre recouvrant des dunes.

Dans la partie méridionale du bassin, on ne trouve pratiquement plus de formations continentales à rapporter au Néogène. Le forage Ferme Ambovombe (planche V) n'a traversé que 5,50 mètres d'arènes et argiles entre le Quaternaire et le socle cristallin. Celui d'Ankitry montre une série marine d'âge inconnu (voir plus haut, paragraphe Oligocène et Miocène). Cette lacune est normale, puisque cette région devait être au Néogène un golfe marin.

Extension du Néogène sous le Quaternaire.— La limite méridionale d'extension du Néogène continental qui est tracée sur la carte planche IV est fondée sur les données des sondages, très espacés dans la zone centrale qui est précisément celle de sa disparition. Il faut signaler en outre qu'au Nord de cette ligne il peut n'exister qu'un très mince niveau néogène, comme à Ambovombe, en avant d'une falaise entaillée dans des formations continentales plus épaisses et fossilisées sous les dunes quaternaires ; il y a là un problème hydrogéologique important sur lequel nous reviendrons.

CONCLUSIONS POUR LE NEOGENE CONTINENTAL.— Il n'apparaît pas qu'une stratigraphie soit jamais possible dans les formations continentales rapportés au Néogène. L'âge même de l'ensemble de la série, à supposer qu'il soit le même dans toutes les régions, ne peut être précisé et les découvertes paléontolo-

giques sont assez improbables. A l'intérieur de la série, J. ARCHAMBAULT (1956) a tenté de distinguer deux niveaux : à la base des sédiments dans l'ensemble plus compacts, plus grossiers et riches en calcaire, au sommet des sédiments meubles, du type sables plus ou moins argileux ; cette subdivision apparaît en fait plus régionale que stratigraphique, en relation avec la proximité et l'altitude du socle cristallin au moment du dépôt ; ceci est particulièrement net dans le bassin d'Ambovombe où, statistiquement, la granulométrie des sédiments diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne des reliefs du socle. Dans les autres bassins, le socle étant mieux pénéplané en amont, les dépôts sont plus homogènes et, dans l'ensemble, plus fins. Dans le détail, les variations verticales de facies sont à mettre en relation avec des modifications climatiques (et aussi peut-être épi-orogéniques) entraînant des conditions différentes de transport et de dépôt, mais on conçoit que ces causes ne soient plus maintenant identifiables.

L'étude du Néogène continental, encore bien incomplète, ne pourra se faire que par multiplication des sondages et prospections géophysiques, ces dernières étant seules susceptibles de fournir des renseignements continus et de déterminer, par exemple, la position des anciens lits fluviaux. Les études granulométriques (dimensions, minéraux lourds, etc.) peuvent éclaircir des points de détail.

Tous les bassins néogènes ont subi, avant le Quaternaire, une pénéplanation à peu près parfaite, mais si cette surface se relie assez bien au Nord avec les plateaux de la région de Bekily, sa prolongation vers le Sud aboutit à un niveau très supérieur au niveau marin actuel ; on doit donc admettre un relèvement épiorogénique entraînant une reprise de l'érosion, d'où le déblayage des sédiments néogènes dans les zones internes et la formation des petites cuestas de bordure, évoluant encore actuellement.

QUATERNAIRE

Une définition stricte du Quaternaire n'est pas possible à Madagascar, puisqu'il n'y existe pas, à ce jour, de documents préhistoriques. Dans le Sud de l'île, il a paru commode de faire débiter le Quaternaire, tel que nous l'entendons ici, avec l'apparition de l'Aepyornis, dont les débris d'oeufs se trouvent très fréquemment, et dont la disparition paraît relativement récente. Nous n'ignorons pas que c'est peut-être reculer assez loin dans le Tertiaire la limite inférieure du Quaternaire, mais le terme classique nous a cependant paru d'un emploi plus facile que l'appellation d' "Aepyornien" proposée et employée récemment⁽¹⁾, d'autre part l'apparition

(1) BATTISTINI R. 1957.- Note préliminaire sur le niveau marin de 3 m et les séries dunaires de l'extrême Sud de Madagascar. Bull.Soc.Géol.France, 6ème série, t.VII, p.83-90.

de la grande autruche fossile coïncide avec une très nette modification climatique et l'établissement d'un régime dunaire généralisé dans le Sud et se poursuivant jusqu'à nos jours.

Nous décrirons d'abord quelques coupes caractéristiques du Quaternaire puis, séparément, les différents facies représentés.

COUPES CARACTERISTIQUES - Flanc Ouest du Cap Sainte Marie. - X=59,5 ; Y=269. De haut en bas, à partir du point géodésique (altitude 191 m), la falaise Ouest du Cap montre essentiellement des grès blancs, tendres, à ciment calcaire, à grains fins. La coupe est souvent masquée par les éboulis mais on distingue cependant les niveaux suivants :

Cote

- | | |
|---------|--|
| 191-190 | Carapace calcaire. |
| 190-158 | Grès tendre à ciment calcaire, à Gastéropodes. |
| 158-157 | Grès analogue mais avec galets (ou concrétions) arrondis de grès plus compacts. Nombreux Gastéropodes. |
| 157-150 | Grès à ciment calcaire, très pulvérulents, passant aux sables fins. |
| 98 | Niveau épais de 1,5 mètres, formant surplomb, de grès à ciment calcaire très fossilifère. |
| 78 | Concrétions tubulaires calcaires dans les grès. |
| 66 | Niveau à petits galets de grès compact (1,5 m). |
| 55 | Niveau de grès plus grossiers, nettement stratifiés, pauvre en fossiles. |

La suite de la coupe se trouve un peu plus au Sud, dans le ravin cité à propos de l'Oligocène-Miocène.

- | | |
|----------|--|
| 36- 28 | Grès saumon, pulvérulent, horizontal, à nombreux petits Gastéropodes. |
| 28 -27,5 | Grès à graviers de 3 à 6 mm de diamètre, à débris d'oeufs d' <u>Aepyornis</u> ; très nombreuses coquilles et opercules de Gastéropodes. |
| 27,5-22 | Grès assez grossier, toujours à ciment calcaire, avec opercules de Gastéropodes. |
| 22- 19 | Grès à graviers : très nombreuses coquilles à la base. |
| 19- 15 | Grès saumon, à grain fin, compact, pauvre en coquilles, formant surplomb au-dessus de grès argileux verdâtres (sommet de la coupe décrite précédemment). |

Le Quaternaire est ici épais de 176 mètres et comprend à peu près uniquement des formations dunaires inégalement cimentées. Les niveaux à galets et graviers suggèrent cependant des épisodes de ruissellement. La pré-

sence de grès de teinte saumon vers la base du Quaternaire dunaire est assez générale dans le Sud de Madagascar.

Sondage Ankitry. - $X=91,2$; $Y=339,3$. Le log simplifié de ce sondage figure planche V. La base des formations attribuées au Quaternaire est formée par des sables non cimentés, à grains roulés, reposant à 120,5 m de profondeur (altitude -27,5) sur les dolomies d'âge inconnu, déjà citées ; ces sables d'abord moyens puis grossiers, avec des graviers et petits galets siliceux correspondent vraisemblablement à des dépôts marins littoraux ; leur sommet se trouve à l'altitude -3 m. Au-dessus vient une série entièrement dunaire, épaisse de 96 mètres, comprenant des sables orangés, fins, non calcaires et des bancs de grès tendres à ciment calcaire contenant des débris d'oeufs d'Aepyornis et des moules internes de Gastéropodes. On peut supposer que chaque succession sable-grès correspond à un système dunaire dont le sommet est grésifié ; on aurait dans ce cas une dune ancienne de -3 à +10 m d'altitude, une seconde dune jusqu'à l'altitude +81, dont le sommet gréseux affleure largement au Sud-Ouest du sondage, une dune récente en surface, dont on ne voit que la base mais qui entoure la cuvette où a été effectué le forage.

Sondage Ferme Ambovombe. - $X=107,35$; $Y=366$. Log planche V. Comme à Ankitry, le Quaternaire probable débute par des sables à graviers, avec une intercalation de grès à ciment calcaire et, au sommet, un banc de grès à ciment siliceux très compact ; cette série littorale se trouve maintenant entre les cotes -43 et -20 m. Au-dessus, jusqu'à l'altitude +75 m, on trouve uniquement des sables fins blancs à beiges, calcaires, que le mode de sondage (au battage) n'a pas permis de distinguer des grès à ciment calcaire, dont quelques fragments ont été récupérés ; il s'agit en tous cas d'une formation dunaire⁽¹⁾.

La série supérieure, de 0 à 48 mètres, est très différente, avec une alternance irrégulière d'argile sableuse gris-verdâtre à passées de sables jaunes fins argileux, de sables fins peu argileux, à grains bien roulés et une intercalations de sables fins et grès à ciment calcaire entre 8,4 et 16,8 m de profondeur. Il s'agit là de formations lacustres affleurant dans la cuvette d'Ampamolora, les niveaux de sables et grès calcaires correspondant à un petit épisode dunaire.

(1) Parmi les déblais remontés de la profondeur de 132 m, R. PAVLOVSKY a signalé la présence d'un débris de poterie.

FORMATIONS MARINES ET LITTORALES. - La morphologie et la constitution du littoral de l'extrême Sud font actuellement l'objet d'études détaillées par R. BATTISTINI et nous ne nous étendrons guère ici sur ces sujets, au demeurant assez éloignés de l'hydrogéologie. Suivant les premières conclusions de cet auteur, une transgression au Quaternaire (Aeeyornien) moyen aboutit à des dépôts de plages actuellement à la cote +3 m ; elle est suivie par une régression marine importante au-dessous du 0 actuel, avec formation de dépôts continentaux de piedmont (plaine côtière de Lavanono, par exemple), attaqués par une nouvelle transgression considérée comme flandrienne.

Les dépôts marins épais signalés dans les coupes des sondages Ankitry et Ferme Ambovombe ne sont connus qu'en ces deux points, mais il est très probable qu'ils existent dans toute la zone côtière du bassin d'Ambovombe, sous le même facies de sables moyens à grossiers, à grains bien roulés, à graviers et petits galets siliceux. On ne peut rien dire sur leur limite d'extension vers le Nord.

Les plages actuelles sont sableuses, avec de très nombreux débris de coquilles et de coraux. Dans la zone de balancement des marées, on remarque presque partout une plate-forme constituée par des grès extrêmement cimentés et très compacts. Les récifs coralliens sont particulièrement bien développés sur la côte Sud-Ouest et Ouest.

Les formations les plus importantes, parce que les plus étendues vers l'intérieur, sont les vases marines particulièrement développées entre l'embouchure de la Menarandra et celle de l'Onilahy. En dehors des lagunes actuellement actives, comme la baie de Bevoalava, la baie de Langarano, au Nord d'Androka, d'ailleurs en voie de fermeture par des flèches sableuses, il existe de multiples cuvettes de toutes dimensions correspondant à d'anciennes lagunes et comblées par des argiles et marnes généralement salées. Les plus importantes sont les marais d'Elosy et le Lac Tsimanampetsotsa (alimentés d'ailleurs actuellement par des eaux douces). Ces vases marines sont souvent à des altitudes supérieures au niveau actuel de la mer : l'extrémité Nord de la dépression du Tsimanampetsotsa est à la cote +10 (d'après la carte du Service Géographique de Madagascar) et des cotes comprises entre 1,5 et 3 m sont signalées par R. PAVLOVSKY (1951).

FORMATIONS DUNAIRES. - Par leur extension et leur puissance, les formations dunaires ont une importance considérable. Localement, il est possible de distinguer des dunes superposées, mais il nous paraît difficile d'établir des corrélations certaines à grandes distances, aussi est-il préférable d'étudier ces formations par régions. Il est cependant un double caractère commun à toutes les zones : la direction des vents dominants paraît avoir été très constante car les directions dunaires anciennes sont très voisines de celles des dunes vives actuelles, et la faune est très homogène du haut en bas de

la série, avec Aepyornis et des Mollusques terrestres étudiés par L. GERMAIN⁽¹⁾, les genres les plus fréquents sont Clavator et Tropidophora.

De l'Onilahy à Anjaha (X=191), la zone côtière à l'Ouest de la falaise éocène est presque entièrement constituée par des grès et sables comparables à ceux du Cap Sainte Marie, où l'on distingue encore, surtout dans la région d'Antanandranto, des directions dunaires subméridiennes. Leur puissance est inconnue car on ne dispose d'aucun sondage profond, mais, au Nord de l'Onilahy, le sondage T.U.1 bis les a traversés de 25 à 80 mètres de profondeur, au-dessus du Lutétien, c'est-à-dire que leur base est très nettement au-dessous du 0 actuel. En bord de mer, on distingue une dune récente fixée et un mince cordon discontinu de dunes actuelles.

D'Anjaha au Sud d'Itampolo les grès quaternaires anciens ont partiellement recouvert la falaise du plateau calcaire Mahafaly et s'étendent sur la zone des avens dans la région du Kelialana. Les parois de l'aven Vintany, près d'Itampolo, montrent une dizaine de mètres de grès à Gastéropodes et Aepyornis, contenant quelques blocs de calcaires éocènes. Dans la région de Vohombe, des dunes anciennes, à relief conservé, s'étendent sur une quinzaine de kilomètres à partir de la côte ; elles sont recouvertes par les dunes récentes fixées et par la dune actuelle. En bord de mer, on retrouve les grès du Quaternaire ancien (Lambetaka-Masay, Lambetabe).

Du Sud d'Itampolo à la Linta, les grès quaternaires débordent entièrement la falaise calcaire, masquent la zone des avens et vont recouvrir l'Eocène à Huîtres à l'Ouest de la Linta ; la falaise fossilisée de l'Eocène se devine cependant sous le Quaternaire, jalonnée par les sommets Antaliabo et Sambatio. La seule coupe importante dans la plaine côtière est celle du puits de Maimborano, près de Nisoa, qui traverse les grès de la cote +37 à la cote +10 m sans atteindre leur substratum inconnu.

Dans cette région, les dunes actuelles recouvrent directement les grès anciens et les vases marines ; les sables alluviaux du lit de la Linta, constamment sec, constituent pour les vents du Sud-Est un matériau tout proche et les dunes, souvent en croissant, s'étendent rapidement sur les anciennes lagunes.

De la Linta à la Menarandra, on peut distinguer quatre systèmes dunaires ; les grès du Quaternaire ancien, souvent plus ou moins évolués (sables roux) recouvrent le plateau éocène jusqu'à une dizaine de kilomètres au Nord de la falaise et celle-ci n'apparaît qu'entre Kilibory et la Menarandra ;

(1) GERMAIN L. 1916-1921.- Paléontologie de Madagascar. IX. Mollusques quaternaires terrestres et fluviatiles. Ann.Paléont., t.X, p.23-56.

comme plus au Nord-Ouest, leur puissance et la nature de leur substratum dans la zone côtière sont inconnus. Une seconde dune ancienne, à contours nets mais sans relief conservé, affleure entre Evanga et Kilibory jusqu'à des altitudes supérieures à 100 m. La dune récente fixée a une extension considérable, depuis la baie de Bevoalava jusqu'au Sud de Saodona (35 kilomètres) sur une largeur de 4 kilomètres ; sa partie terminale Nord-Ouest est reprise par les vents actuels et son bord Sud est recouvert par la dune vive s'étendant d'Ampalazà à Manera sur une profondeur de 2 à 3 kilomètres à partir de la côte. Sous la dune vive, on voit apparaître la dune récente dans les dépressions de Mäliolanitsy.

De la Menarandra à Lavanono, les grès quaternaires anciens ne sont plus visibles dans la plaine côtière mais forment la quasi totalité du plateau Karimbola, ne laissant apparente qu'une étroite bande éocène au Nord-Ouest. Au Nord, ils reposent directement sur les formations continentales néogènes suivant une limite très imprécise, passant approximativement à quinze kilomètres de la côte et sont recouverts par des sables roux superficiels ou des carapaces calcaires ; les photographies aériennes montrent encore de très faibles directions dunaires Ouest-Nord-Ouest Est-Sud-Est.

La zone côtière de la Menarandra à Tsivaha est occupée par d'épaisses dunes récentes fossilisant en partie la falaise gréseuse et surmontées elles-mêmes par des dunes vives actuelles atteignant 211 mètres d'altitude au sommet Anandriana. Ces dunes vives forment également un cordon côtier au-dessus des dépôts de piedmont, entre Tsivaha et Lavanono. Nous avons vu que, dans cette région, leur substratum argileux pouvait être d'âge néogène.

De Lavanono au Manambovo, les dunes récentes et actuelles ont au contraire une faible extension : à l'Ouest, la plaine de Lavanono est protégée des vents dominants par le Cap Sainte Marie ; à l'Est, il n'existe plus de plaine côtière et les dunes actuelles sont plaquées contre la falaise, sans parvenir au sommet du plateau. Celui-ci est entièrement formé par les sables et grès tendres à ciment calcaire type Cap Sainte Marie, jusqu'à une ligne assez imprécise Est-Ouest passant par Tsihombe. En surface, on ne voit guère que des sables roux et des îlots de carapace calcaire ; la photogéologie montre des directions dunaires surtout dans la région du Cap Sainte Marie.

Du Manambovo au Mandrare, les formations dunaires quaternaires prennent leur maximum d'extension et apparaissent jusqu'à près de 40 kilomètres de la mer actuelle. Les coupes des sondages Ankitry et Ferme Ambovombe ont été décrites plus haut et nous avons vu que les sables et grès y avaient près de 100 mètres de puissance, mais en tenant compte des dunes non traversées entourant la cuvette d'Ankitry, la puissance totale peut être supérieure à 200 mètres ; à l'extrémité orientale du plateau de Sampona, les formations dunaires s'élèvent jusqu'à 371 mètres d'altitude au sommet Andranogoa et il est probable que leur base est là au-dessous du niveau de la mer. Au sondage Erada (planche V), les sables de dunes ont encore 80 mètres de puissance à plus de 30 kilomètres de la côte.

Le liseré littoral de dunes actuelles, qui ne dépasse pas quelques centaines de mètres de largeur, s'élève en général entre 50 et 75 mètres, mais atteint près de 100 mètres près d'Egaha, au Sud-Est d'Ambovombe, et Kotoala ; il est souvent séparé de la falaise par des dépressions entre 30 et 50 mètres (Kotoala, Malaindoza, Ionka, Egaha). La falaise, assez abrupte à l'Est, plus adoucie à l'Ouest, s'élève à 100-125 mètres d'altitude ; les grès à ciment calcaire qui la forment sont visibles en quelques points (Beaniky, Tafia), mais elle est en général recouverte par une dune récente fixée qui s'étend sur la partie Sud du plateau de Sampo-na et sur les collines du Mahandrovato, jusqu'à 16 kilomètres de la mer au Sud-Ouest d'Ambondro. Le relief dunaire y est bien conservé avec de très nombreuses cuvettes (où se concentrent les cultures) ; les sables sont blancs ou jaunes et contiennent des carapaces calcaires blanches en général peu épaisses.

Les sables provenant des dunes plus anciennes et des grès à ciment calcaire sont le plus souvent de teinte rouge et il est difficile de tracer de façon précise leur limite septentrionale, car Néogène et socle donnent également des sols roux. A l'Est, le plateau de Beanantara paraît entièrement constitué par les dunes anciennes, sur une épaisseur qui peut atteindre 200 à 300 mètres (voir coupe 12, planche III^b) ; à l'Ouest, le plateau d'Ambondro, au-dessous d'une mince pellicule de Quaternaire continental, est également formé par les sables et grès quaternaires ; ceux-ci n'existant pas dans le sondage Laparoy, 10 kilomètres au Nord d'Erada où ils ont encore 80 mètres, on est conduit à admettre une limite Est-Ouest aux environs du parallèle X=115, avec un rebord dunaire bien marqué. Dans la région centrale, sous les formations de la cuvette d'Ampamolora, on ignore absolument actuellement la limite Nord des dunes trouvées à Ambovombe entre 48 et 143 mètres.

Plus anciennes que les dunes du Mahandrovato, mais superposées au Quaternaire continental, des formations dunaires peu épaisses, mais d'une grande importance hydrogéologique, affleurent à Ambovombe et Ambondro. Ce sont des sables roux assez argileux, avec lits de grès à ciment calcaires et croûtes calcaires blanches ; leur épaisseur ne dépasse pas 30 mètres à Ambovombe.

FORMATIONS LACUSTRES ET DE PIEDMONT.— Une sédimentation continentale, lacustre ou de piedmont, suivant les conditions topographiques, a eu lieu au Quaternaire pendant une ou plusieurs périodes pluviales (la principale de ces périodes se plaçant au Quaternaire supérieur d'après BATTISTINI). Les dépôts de ce type ne sont actuellement connus que dans les régions décrites ci-dessous, mais il n'est pas exclu qu'il en existe d'autres sous les formations dunaires, en particulier dans le plateau de Beanantara et le plateau Karimbola.

Cuvette d'Ampamolora. - Approximativement limitée par la courbe du niveau 150 m, la cuvette d'Ampamolora-Ambovombe occupe le centre du bassin sédimentaire d'Ambovombe, entre les plateaux de Beanantara et d'Ambondro ; elle est fermée au Sud par la dune d'Ambovombe. Au Nord, plusieurs thalwegs se dirigent vers la cuvette mais disparaissent avant de l'atteindre dans des zones d'épandage alluvial ; le principal de ces thalwegs est la rivière d'Antanimora, qui se perd en aval immédiat de Manavy. Le fond de la cuvette, d'Ambaliandro à Ambovombe, est formé par des marnes et argiles correspondant à un ancien lac, alimenté à la fois par les rivières venant du Nord et par le ruissellement sur les pentes Est et Ouest de la cuvette ; ce lac se forme d'ailleurs encore temporairement : le cyclone des 29, 30 et 31 Janvier 1951 a déversé sur la cuvette des hauteurs d'eau de 567 et 593 mm, créant un lac de 17 kilomètres de longueur et 4 kilomètres de largeur, qui mit deux ans à s'assécher.

Avec quelques intercalations dunaires, la série lacustre atteint 48 mètres de puissance au forage Ferme Ambovombe ; elle comprend cinq niveaux principaux d'argile gris verdâtre, la plus épaisse, à la base, ayant 8 mètres de puissance, et des sables fins argileux. A Ampamolora, l'âge des marnes, sables, calcaires puis argiles traversés sur 59 mètres n'est pas déterminé car le substratum n'est pas connu.

Plateau d'Ambondro. - Sur le plateau d'Ambondro, ainsi que dans les régions de Laparoy et Betaranta, il existe de très nombreuses petites cuvettes fermées, dont le fond, souvent occupé par une mare, est constitué par des argiles. Le pourtour de ces cuvettes est formé par des sables blancs ou roux, les seconds ayant une origine très probablement dunaire. Faute de sondages, il n'est pas possible de dire s'il s'agit d'un remplissage de cuvettes entre dunes anciennes ou de couches continues qui seraient surmontées par des dunes plus récentes. Nous penchons plutôt pour la seconde hypothèse. Au sondage Erada, on trouve, presque au fond d'une de ces cuvettes, 1,25 m de sables argileux gris clair, fins, à grains roulés, puis 1,50 m de marne grise plastique peu sableuse et 1,50 m d'argile ocre plastique reposant sur la série dunaire.

Région de Beloha. - Des formations analogues à celles du plateau d'Ambondro existent dans la région de Beloha, également sous des sables blancs, mais reposant directement sur des terrains néogènes qu'il est difficile d'en séparer. Le sondage de Beloha a traversé 6,5 m d'argile sableuse qui affleure d'ailleurs dans la partie Nord de la localité ; celui de Masina a trouvé le même niveau sur 4 mètres ; beaucoup plus à l'Est, le sondage Montovositra a rencontré 8 mètres d'argiles jaunes sableuses, également sous des sables blancs.

Plaine de Lavanono..- De la base de la grande falaise, à partir de l'altitude moyenne de 75 mètres, jusqu'à la mer, la région côtière de Lavanono, d'Antaramaity à Tsivaha, est constituée en surface par des formations sablo-argileuses, avec brèches de pente et poudingues, reposant sur les argiles et marnes attribuées au Néogène ou sur les calcaires éocènes. Ces formations de piedmont doivent également correspondre à une période pluviale quaternaire.

ALLUVIONS..- Tous les thalwegs à écoulement temporaire situés sur le socle cristallin comportent un lit d'alluvions sableuses en général peu épaisses (0,50 à 3 m) et, dans les zones topographiquement favorables, une terrasse alluviale surélevée de 3 à 10 mètres ; les alluvions anciennes sont le plus souvent riches en limons, alternant avec des grès grossiers argileux.

Dans les zones sédimentaires, il n'y a, en dehors des fleuves, que des écoulements très temporaires dans des thalwegs à peine marqués, sans alluvions récentes. Toutefois, ces vallées ont pu fonctionner plus régulièrement au Quaternaire et on y trouve des alluvions anciennes, sablo-argileuses, très évoluées, aisément repérables sur les photographies aériennes. Dans le bassin de Beloha, le thalweg Imaririny et ses affluents (Noga, Boboka) sont remplis par ces alluvions anciennes qui peuvent atteindre un kilomètre de large. Des vallées analogues existent dans la dépression d'Itrobeka, dans la région de Beahitse, dans la partie Ouest du plateau de Vohitsara.

Les fleuves (Onilahy, Linta, Menarandra, Manambovo, Mandrara) ont tous un lit mineur sableux ; les alluvions anciennes sont irrégulièrement développées. Sur l'Onilahy, elles sont localisées, entre Maropia et l'embouchure, dans les coudes du fleuve ; les terrasses anciennes de la Linta sont étendues d'une part entre Ejeda et le confluent de la Manakaralahy, d'autre part dans la région d'Ankazontaha-Bekily, avant l'entrée dans les calcaires éocènes ; dans la traversée du plateau, il n'y a que quelques petites terrasses sableuses et les alluvions ne s'étendent à nouveau que près de l'estuaire, dans la plaine d'Androka, plus ou moins mêlées aux vases marines et recouvertes par les dunes.

Les alluvions de la Menarandra sont beaucoup plus importantes ; entre l'entrée à Lovokarivo dans les formations sédimentaires et les gorges d'Erea, elles forment une plaine continue qui a plus de 4 kilomètres de large, à hauteur d'Ampotaka ; on peut y distinguer une basse terrasse peu au-dessus du lit sableux actuel, en général argileuse, et une haute terrasse 5 à 6 mètres au-dessus de la première, plus sableuse. Les sols ont

été étudiés par H. BESAIRIE⁽¹⁾.

Sauf quelques poches dans son cours moyen, en aval d'Ampilofilo et entre Ambatopilaky et Behazomanga, les alluvions du Manambovo n'ont une certaine importance qu'en aval du confluent de la Sakamasy. Celles du Mandrara sont au contraire très étendues, depuis l'amont d'Ifotaka jusqu'à la dune côtière, avec deux niveaux de terrasses.

FORMATIONS SUPERFICIELLES. - Ce sont, malheureusement pour la géologie, les formations superficielles qui apparaissent le mieux sur le terrain et sur les cartes. Leur étude relève d'ailleurs plus de la pédologie⁽²⁾ que de la géologie, surtout lorsqu'il s'agit de sols à matériau originel allochtone. Nous ne retiendrons ici que les principaux types, en conservant la terminologie, très compréhensive mais pratique, de la carte géologique au 1/200.000.

Sables roux. - On peut distinguer au moins quatre types de sables superficiels, de teinte variant entre le jaune et le rouge foncé, suivant la nature du matériau originel. Les plus étendus sont ceux qui proviennent des sables et grès dunaires mais qui dépassent largement vers le Nord la limite des dunes ; ce sont en général des sables à grains très fins, roses lorsqu'ils sont peu évolués (plateau de Beanantara par exemple), rouges dans le cas contraire. Quand elle provient du Néogène continental, la carapace sableuse est généralement plus argileuse et a souvent une teinte brun-jaune, assez caractéristique dans la région au Nord de Beloha. Sur le socle cristallin, ou lorsqu'ils proviennent des roches cristallines, les sables roux sont nettement plus grossiers, souvent rouge foncé et ne paraissent pas avoir subi de transport important, car leurs grains sont anguleux. Enfin, des sables argileux roux de décalcification remplissent les dépressions et vallées du plateau calcaire Mahafaly.

Sables blancs. - Au milieu des sables roux, il s'isole parfois des zones de sables blancs ou gris, dont l'origine complexe est mal élucidée. Il pourrait s'agir de sables éoliens remaniés par ruissellement et la coïncidence fréquente de ces sables blancs avec les formations argileuses quaternaires n'est sans doute pas fortuite. Les principaux affleurements sont dans le bassin d'Ambovombe (régions d'Ambondro, Laparoy, Betaranta), dans une zone

(1) BESAIRIE H., 1935. - Les sols de la basse Menarandra. Ann.Géol.Serv. Mines. Madagascar, fasc.V, Tananarive.

(2) Institut de Recherche Scientifique de Madagascar. Carte pédologique de reconnaissance au 1/200.000. Feuille n°64 Ambovombe (1957).

allongée allant du Nord-Ouest de Beloha au Sud de Tsihombe, dans la région d'Antsasampa-Antaimby, au Sud d'Ampanihy.

Carapaces calcaires..- Des calcaires secondaires, à grains siliceux, se sont formées à partir d'une part des formations dunaires, où elles sont généralement discontinues, d'autre part sur le plateau calcaire Mahafaly où elles masquent tous les affleurements.

Carapaces ferrugineuses..- En quelques points, on trouve des carapaces ferrugineuses pisolithiques peu étendues (plateau de Lovokarefo, dépression d'Itrobeka).

Nous allons d'abord examiner les conditions générales d'existence des nappes aquifères dans le Sud de Madagascar en les groupant suivant les disciplines auxquelles leur étude fait appel : climatologie d'une part, géologie d'autre part, pour décrire ensuite ce que l'on sait des différents systèmes aquifères actuellement reconnus.

CONDITIONS D'EXISTENCE DES NAPPES

CONDITIONS CLIMATIQUES

PLUVIOMETRIE. - Dans la zone étudiée et à ses abords immédiats, on dispose d'une quinzaine de stations pluviométriques où les durées d'observations, différentes suivant les points, varient de sept (Soalara) à plus de 25 ans (huit stations).

Si l'on considère d'abord uniquement les moyennes annuelles des pluies, on aboutit aux isohyètes annuelles tracées sur la planche VI. On constate tout d'abord que les pluies dans le Sud et le Sud-Ouest sont parfaitement indépendantes du régime climatique de la côte Est de l'île, fortement pluvieux, avec plus de 1500 mm par an à Fort-Dauphin : les chaînes Anosyennes constituent une barrière se traduisant sur la carte par une véritable "faille" pluviométrique et sur le terrain par un très rapide changement de végétation, sur quelques centaines de mètres, bien visible au col de Ranopiso, 30 kilomètres à l'Ouest de Fort-Dauphin, de la végétation ombrophile de la côte Est au bush épineux du Sud.

A l'Est de cette faille pluviométrique, les courbes d'égale pluviosité annuelle sont grossièrement parallèles au rivage, avec décroissance des pluies de 700 mm/an environ dans la région de Bekily à 300 mm/an sur la côte Sud-Ouest. Les minima connus sont à Androka (224 mm) et Soalara (239 mm), mais il faut remarquer qu'il n'existe aucune station sur le plateau Mahafaly qui paraît encore plus sec.

L'examen année par année des pluies annuelles fait ressortir de très grandes irrégularités, schématisées planche VII pour trois stations principales ; le total annuel varie de 130 mm (1948) à 666 mm (1952) à Tuléar, de 380 mm (1943) à 1050 mm (1952) à Ampanihy, de 295 mm (1943) à 968 mm (1951) à Ambovombe, et l'amplitude des variations est comparable pour les autres stations. On constate en outre des successions de deux, trois, exceptionnellement quatre années sèches, alors que les années de pluies supérieures à la moyenne sont très généralement isolées ; elles correspondent le plus souvent à des cyclones.

Le nombre moyen de jours de pluie par an varie de plus de 70 à Ambovombe et Tsihombe à moins de 40 sur la côte Ouest, c'est-à-dire parallèlement aux moyennes annuelles. Là encore les variations sont importantes d'une année à l'autre (voir planche VII) et parallèles aux hauteurs de pluie, sauf lorsqu'il s'agit de cyclones importants ayant déversé de grosses quantités de pluie en très peu de jours. Il est en fait surtout intéressant, du point de vue qui nous occupe, de considérer le nombre de jours de pluies importantes ; elles figurent, pour quelques stations, dans le tableau suivant :

Station	Pluies annuelles	Nombre de jours de pluies supérieures ou égales à			
		0,1	10	30	50mm
Tuléar	342	31	10	6	0
Betioky	585	76	34		6
Ejeda	515	55	26		6
Ampanihy	573	75	20		2
Beloha	422	72	24		2
Tsihombe	493	71	16	6	0
Ambovombe	597	100	17		2
Antanimora	555	47	15		3

Les chiffres des deux premières colonnes de ce tableau diffèrent légèrement de ceux de la planche VI, car cette statistique porte sur une période différente. On remarque le chiffre peu élevé du nombre de jours où la hauteur de pluie est supérieure ou égale à 10 mm. Pour la station d'Ambovombe, et pour les trois années 1955-56-57 on a le tableau suivant :

Année	Nombre de jours de pluies supérieures ou égales à							
	0,1	1	10	20	30	40	50	60mm
1955	72	55	14	5	1	0		
1956	74	56	9	4	2	2	1	1
1957	57	47	12	5	3	3	1	0

Les moyennes mensuelles des pluies montrent une saison relativement humide de Décembre à Mars et une saison nettement sèche d'Avril à Novembre, mais il s'agit, en réalité, de saisons purement "statistiques", car si on reporte sur un même diagramme d'une part les moyennes mensuelles, d'autre part les minima et maxima mensuels relevés au cours de la période considérée (planche VII) on constate, pour Ambovombe par exemple, que le maximum observé pendant le mois statistiquement le plus sec est presque égal au maximum moyen et que le minimum du mois statistiquement le plus humide est inférieur au minimum moyen (il est d'ailleurs pratiquement nul).

Nous ne pouvons mieux faire pour définir le régime des pluies que de reprendre les termes d'un spécialiste⁽¹⁾: "Dans l'extrême Sud de Madagascar, la répartition des pluies est très irrégulière au cours de l'année. On peut néanmoins mettre en évidence une petite saison des pluies de durée très variable (4 à 17 décades) commençant entre la troisième décade d'Octobre et la première décade de Janvier pour se terminer entre la deuxième décade de Janvier et la première décade de Mai. Les maxima décadaires se produisent généralement pendant la saison chaude (16 fois sur 18) mais ils peuvent se produire quelquefois pendant la saison fraîche. Des sécheresses s'étendant sur plusieurs mois consécutifs peuvent se produire (15 décades successives en 1943)"⁽²⁾.

EVAPORATION ET TRANSPIRATION. - On sait que l'évaluation des quantités d'eau retournant presque immédiatement à l'atmosphère par évaporation et transpiration des plantes présente de grandes difficultés, du fait du nombre des facteurs qui interviennent. La mesure expérimentale de l'évaporation d'une nappe d'eau libre est relativement facile, mais les résultats obtenus ne sont pas applicables à l'évaporation à partir du sol (ils sont généralement plus élevés), car la nature de ce sol et son état ont une grande importance. Quant à la transpiration, il n'existe aucune technique au point.

Puisqu'il s'agit, en définitive, de déterminer la quantité d'eau susceptible de s'infiltrer ou de ruisseler sur le sol, les deux phénomènes évaporation et transpiration peuvent être considérés ensemble, mais la détermination expérimentale de l'évapotranspiration exige l'aménagement de parcelles expérimentales avec lysimètres ; les résultats ne sont d'ailleurs valables que pour un sol et une végétation donnés, dans une région déterminée. Il n'existe pas de telles stations dans le Sud de Madagascar et nous n'avons aucun chiffre expérimental sur l'évapotranspiration.

Plusieurs formules ont été établies pour relier l'évapotranspiration aux données climatiques. Parmi les facteurs à considérer (pluie, température, ensoleillement, rayonnement, humidité, vent...) certains ne sont pas connus dans le Sud de Madagascar et les formules sont alors inutilisables ; dans quelques cas la latitude du lieu intervient dans les formules, pour tenir compte des variations de la longueur du jour, donc de l'ensoleillement, ce qui est évidemment très approximatif ; enfin, il ne saurait être question de mettre en équation le sol et la végétation.

(1) RAVET J., 1950. Publ.Serv.Météo. Madagascar, N°20.

(2) Toutes les indications données ci-dessus sont issues des relevés du Service Météorologique de Madagascar.

Quelque imparfaites que soient ces formules elles peuvent tout de même fournir un ordre de grandeur pour l'évapotranspiration et le sens de ses variations. Dans certains pays les valeurs ainsi calculées coïncident assez bien avec les valeurs expérimentales. Disons immédiatement qu'il ne semble pas en être de même dans le Sud de Madagascar.

L'évapotranspiration potentielle annuelle, qui est la quantité d'eau qui retournerait à l'atmosphère si le sol était toujours bien pourvu en eau et portait une végétation optima (?) a été calculée par J. RIQUIER pour Madagascar, d'après les formules de THORNTHWAITE, PRESCOTT et TURC ; la première de ces formules permet de dresser une carte (planche VI, bas) où figurent les courbes de même évapotranspiration potentielle. On voit que, dans la région considérée, il retournerait à l'atmosphère, théoriquement, entre 1200 et 1400 mm d'eau par an, c'est-à-dire que l'évapotranspiration réelle serait égale aux précipitations et que l'infiltration dans le sol serait nulle. Les autres formules donnent des résultats comparables et conduisent à la même conclusion.

Quand on considère les moyennes non plus annuelles mais mensuelles de l'évapotranspiration potentielle, la formule de THORNTHWAITE permet de déterminer des mois humides où une certaine quantité d'eau peut s'infiltrer dans le sol ou ruisseler et des mois secs où il y a déficience en eau. Pour notre région, il n'y a aucun mois humide ; tout au plus constate-t-on une moindre déficience théorique entre Mai et Septembre.

DISCUSSION. - Ainsi nous trouvons-nous devant un paradoxe apparent : aucune alimentation régulière n'est possible, de façon directe, à partir des précipitations, mais il existe cependant des nappes aquifères.

Deux solutions sont alors vraisemblables : ou bien les nappes actuelles sont "fossiles" et en voie de tarissement par exploitation, ou bien elles sont alimentées indirectement par drainage souterrain ou à partir des eaux de ruissellement. La première hypothèse peut être appuyée sur quelques faits : disparition de quelques nappes (Nappes superficielles de Montovositra, d'Andray), débit insignifiant de certains puits anciens réputés autrefois intarissables ; ces faits ne sont pas probants, car, dans le même ordre d'arguments, on peut citer des nappes comme celle de Namandriha au Sud-Est de Beloha, utilisée en 1910, recherchée sans succès jusqu'à 13 mètres de profondeur en 1917 et débitant à nouveau normalement en 1948 au moins et jusqu'en 1958 ; un cas analogue est cité pour Kirimosa, où le débit de 2 litres/heure signalé en 1918 est très largement dépassé actuellement ; dans la plupart des cas, le tarissement peut s'expliquer par vieillissement du puits et colmatage des parois par des matières argileuses.

Une alimentation généralisée par drainage suppose l'existence de nappes aquifères elles-mêmes alimentées en amont des nappes actuelles, or l'amont du sédimentaire est constitué par le socle cristallin où la nappe superficielle

le est très discontinue ; d'autre part, si l'on s'en tient aux formules précitées exprimant l'évapotranspiration, il faudrait remonter, pour qu'une alimentation soit possible, jusqu'à une ligne Benenitra-Ampandrandava, dans le cas de la formule de THORNTWHAITE et, dans le cas plus favorable de la formule de TURC, jusqu'à une ligne Bezaha-Ampanihy-Ambovombe (courbe 0 de drainage et ruissellement). Nous verrons à propos de la nappe générale, souvent captive, qu'une alimentation par drainage à partir du socle cristallin, au moins partielle, doit être invoquée, mais ce n'est pas le cas général et le processus est strictement irréalisable dans le cas de nappes perchées, comme celle de Beomby-Lovo, sur le plateau calcaire Mahafaly, pour laquelle la zone d'alimentation topographiquement et stratigraphiquement possible est tout à fait isolée, dans une zone où les précipitations annuelles sont de 400 à 500 mm et où l'évapotranspiration annuelle théorique est estimée à plus de 1300 mm.

L'hypothèse d'une alimentation des nappes à partir des eaux superficielles est certainement exacte, au moins en partie, à proximité des cours d'eau, pour les nappes alluviales et dans quelques cas particuliers comme celui de la nappe d'Ambovombe ; elle est indéfendable pour la plupart des nappes dont le niveau piézométrique est à une altitude supérieure à celui des cours d'eau. Au demeurant les zones de ruissellement possible sont extrêmement rares dans la région sédimentaire (l'absence de reliefs résultant du ruissellement est très symptomatique) et les cours d'eau ont, en dehors de crues très brèves, des débits peu importants ou nuls.

Il est un argument qui réfute les hypothèses précédentes et doit obliger à réviser les conclusions des formules d'évapotranspiration moyenne : les nappes aquifères, y compris et surtout les nappes pour lesquelles on ne peut concevoir d'autres alimentations que directement par les pluies, montrent des variations de niveau piézométrique qui peuvent atteindre plusieurs mètres d'amplitude, avec abaissement en sécheresse et remontée après les pluies importantes. Nous citons plus loin de multiples exemples de telles variations. La durée des observations et leur irrégularité ne permettent malheureusement pas encore d'établir des relations précises entre les pluies et le niveau des nappes.

L'hypothèse couramment avancée consiste à dire que les nappes du Sud ne s'alimentent que durant les années de cyclone ou surtout pendant les grandes pluies cycloniques ; il est bien évident que des hauteurs d'eau de 300 à 600 mm déversées en quelques jours, et provoquant des inondations étendues enrichissent considérablement les nappes ; les formules d'évapotranspiration appliquées à ces années exceptionnelles montrent alors un excès des précipitations ; des nappes aquifères peuvent se former temporairement et les nappes déjà existantes sont fortement gonflées. Mais de telles précipitations sont rares (à Ambovombe, par exemple, en 1922, 1933, 1939, 1949, 1951) et n'expliquent pas les variations de niveau piézométrique, qui semblent bien annuelles, entre les cyclones.

Dans le même ordre d'idée, on a tenté de définir quelle était la hauteur minimum d'une pluie isolée pour qu'une infiltration soit possible. Des expériences ont été effectuées, dans des buts agricoles, sur divers sols de la région d'Ambondro ; nous n'en avons pas les résultats détaillés, mais les premières conclusions étaient qu'un minimum de 40 mm de pluie en une journée était nécessaire pour compenser l'évapotranspiration, c'est-à-dire que, là encore, aucune alimentation directe des nappes ne serait possible en dehors des cyclones.

TENTATIVE D'EXPLICATION. - Pour rendre compte de l'alimentation des nappes aquifères dans le Sud de Madagascar, qui, dans quelques cas au moins, se fait directement par les pluies et même en dehors des périodes de pluies cycloniques, en dépit des résultats aberrants de la théorie, nous devons faire appel d'une part à des considérations climatiques, d'autre part (et nous anticipons un peu sur les conditions géologiques traitées au paragraphe suivant) à des considérations géologiques.

Quiconque a circulé un peu longuement dans le Sud de Madagascar n'a pu manquer d'être frappé par l'alternance irrégulière de longues périodes ensoleillées et de périodes plus courtes, mais atteignant une semaine, de forte nébulosité, la température sous abri n'étant cependant pas nettement différente entre les deux cas. Nous pensons que l'erreur fondamentale des formules théoriques provient de ce qu'elles ne tiennent pas compte de l'ensoleillement et du rayonnement, autrement qu'en faisant intervenir la latitude et que cette approximation n'est pas valable ici.

Les premières expériences sur l'infiltration relatées ci-dessus paraissent entachées d'une erreur du même ordre : effectuées en période d'ensoleillement, c'est-à-dire pendant une période de forte évapotranspiration potentielle, elles aboutissent logiquement à des chiffres minima élevés pour les précipitations, une ombre artificielle temporaire au-dessus d'un sol desséché depuis longtemps ne pouvant être comparée à quelques jours nuageux.

Lorsque l'on examine en détail les données pluviométriques brutes, et non plus les moyennes, on constate que les jours de pluie se groupent fréquemment par périodes de deux à six jours, pendant lesquels l'observation (à défaut de mesures) montre que l'ensoleillement est très faible. On conçoit alors que si la première pluie est immédiatement restituée par évapotranspiration, les suivantes, sans qu'elles soient nécessairement très importantes, puissent s'infiltrer pour rejoindre la nappe phréatique ; même si cette infiltration est lente, elle a le temps de s'exercer à la faveur des jours nuageux qui suivent.

A titre d'exemple, pour la station d'Ambovombe, les précipitations se groupent de la façon suivante, pour les années 1955, 1956, 1957.

Année 1955 : Total annuel = 429 mm en 72 jours

Périodes de	Nombre	Hauteur des pluies dans chaque période	Total (mm)	% du total annuel
2 j.	6	27,2-19,4-15,2-13,0-5,3-3,3	83	19 %
3 j.	8	36,5-27,6-19,0-18,1-17,2-12,9-9,0-8,0	148	34 %
4 j.	1	62,3	62	14 %
15 périodes de 2 à 4 jours			293	68 %

Année 1956 : Total annuel = 410 mm en 74 jours

Périodes de	Nombre	Hauteur des pluies dans chaque période	Total (mm)	% du total annuel
2 j.	7	14,0-13,1-8,6-4,1-1,6-1,4-1,1	44	10 %
3 j.	6	72,6-22,8-22,8-11,9-7,1-5,4	142	34 %
4 j.	4	56,0-44,2-9,5-4,5	114	27 %
5 j.	1	14,2	14	3 %
18 périodes de 2 à 5 jours			314	76 %

Année 1957 : Total annuel = 427 mm en 57 jours

Périodes de	Nombre	Hauteur des pluies dans chaque période	Total (mm)	% du total annuel
2 j.	9	9,5-9,0-8,3-7,3-5,3-4,3-3,2-2,8-1,8	51	12 %
3 j.	4	77,5-22,2-15,8-14,7	130	30 %
4 j.	1	126,8	126	29 %
6 j.	1	51,7	51	12 %
15 périodes de 2 à 6 jours			358	83 %

Nous avons choisi à dessein trois années successives particulièrement sèches, où les totaux annuels sont inférieurs à la moyenne d'Ambovombe, car nous disposons de trois séries de mesures du niveau de l'eau dans les puits, en Avril 1956, Août 1957 et Avril 1958. Pour la nappe d'Ambovombe on constate un léger abaissement de niveau en 1957, par rapport à 1956 (12 à 31 centimètres suivant les puits) ; en 1958, l'abaissement du niveau par rapport à celui de 1957 atteint, pour les mêmes puits, 20 à 78 centimètres. Pour la nappe d'Ambondro, à 30 kilomètres d'Ambovombe, il y a relèvement de niveau

(+ 0,14 mm) en 1957, et abaissement de -1,34 en 1958. Les totaux des pluies en 1956 et 1957 sont comparables, mais il y a eu, en 1956, onze périodes de pluies de 3 à 5 jours et seulement six en 1957.

Il semble donc bien que la répartition des pluies et de l'ensoleillement joue un rôle important dans l'alimentation des nappes aquifères. Il sera nécessaire d'effectuer de longues séries de mesures du niveau piézométrique des nappes et de dépouiller minutieusement les données météorologiques avant de pouvoir préciser et chiffrer le phénomène. Il est probable d'ailleurs qu'il existe aussi une hauteur d'eau minimum, aussi bien pour les groupes de jours de pluie que pour le total annuel.

Suivant J.ARCHAMBAULT (1956), l'alimentation directe des nappes n'est réalisée, dans les régions présahariennes de l'A.O.F., que pour une quantité de pluie supérieure à 400 mm par an ; par analogie avec le climat de la région de Dakar, le même auteur admet pour l'évapotranspiration moyenne annuelle dans le Sud de Madagascar le chiffre de 350 mm. Ces chiffres peu élevés et comparables au déficit évaporatoire dans les pays tempérés paraissent beaucoup plus vraisemblables que les résultats des formules : il est certain que l'évapotranspiration "potentielle" est très élevée pendant les périodes sèches et ensoleillées, mais l'évapotranspiration "réelle" est alors pratiquement nulle car le sol est desséché très peu de temps après les pluies et la consommation d'eau par les plantes est très réduite.

La nature du sol intervient largement pour faciliter ou empêcher l'alimentation des nappes aquifères par infiltration directe. Dans le Sud de Madagascar les roches à l'affleurement et les formations superficielles secondaires présentent très généralement une excellente perméabilité, permettant une percolation dans certains cas quasi-instantanée des précipitations. Les formations assez argileuses comme les sables roux provenant du Néogène sont eux-mêmes souvent recouverts par une pellicule uniquement sableuse. Dans le socle cristallin il y a à la fois arénisation et fissuration en surface ; dans les dunes quaternaires la perméabilité d'ensemble, d'interstices dans le cas général, de fissures dans le cas de dunes grésifiées, est considérable ; sur le plateau calcaire Mahafaly, la carapace calcaire superficielle est constamment fissurée. Au total, sauf sur les zones uniquement argileuses ou marneuses comme la cuvette d'Ampamolora et certaines alluvions anciennes, zones aisément repérables au moment des pluies par les difficultés de circulation qu'elles présentent, les formations superficielles ne s'opposent nulle part à une infiltration rapide des pluies et leur épaisseur, généralement supérieure à deux mètres, protège les eaux d'une évaporation ultérieure. Il existe certainement des zones de percolation préférentielle des eaux superficielles (zones d'épandage des thalwegs du bassin d'Ambovombe par exemple, dolines du plateau calcaire, ou simplement zones de fissuration ou perméabilité localisées) mais nos connaissances sont insuffisantes pour les délimiter actuellement. Il n'a été fait jusqu'ici aucune expérience sur la perméabilité in situ des terrains.

CONCLUSIONS SUR L'ALIMENTATION DES NAPPES. - Nous verrons plus loin, à propos de chaque système aquifère, quels sont le ou les modes d'alimentation les plus vraisemblables. Nous croyons avoir montré et l'existence de certaines nappes démontre qu'une alimentation directe est possible, sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir uniquement les pluies cycloniques ; il faut cependant un minimum de pluies annuelles, que l'on peut fixer aux environs de 400 mm. Dans ces conditions, seules les zones côtières Sud-Ouest et Ouest et la moitié occidentale du plateau Mahafaly ne peuvent être alimentées directement. Les quantités d'eau disponibles pour les nappes sont évidemment d'autant plus importantes que l'on s'éloigne de ces zones et doivent atteindre 200 à 300 mm par an, en moyenne, sur le socle cristallin.

Les pluies cycloniques et les cyclones interviennent localement et irrégulièrement ; les réserves des nappes sont alors fortement accrues et des nappes temporaires peuvent se former. Les apports d'eau importants peuvent, dans les terrains fissurés, ouvrir de nouveaux réseaux de circulation et, dans tous les cas, la qualité chimique des eaux est fortement améliorée.

Le ruissellement superficiel ne joue qu'un très faible rôle, uniquement dans les nappes alluviales (encore verrons-nous que les cours d'eau sont le plus souvent alimentés au contraire par les nappes, sauf dans leur cours inférieur), et dans le cas de certaines nappes à l'aval immédiat de zones de ruissellement comme la nappe d'Ambovombe, en partie, et peut-être la nappe de Beloha.

Les condensations, très importantes en particulier dans les zones côtières du plateau Mahafaly et du plateau Karimbola, ne paraissent cependant pas jouer de rôle direct dans l'alimentation des nappes. Il faut tout de même signaler qu'elles fournissent une grande partie de l'eau nécessaire à la végétation, et diminuent par conséquent les pertes pour les précipitations normales ; elles ont en outre une utilité pratique pour l'alimentation humaine.

Dans les régions où aucune alimentation directe n'est possible et pour les nappes en partie captives, nous verrons qu'il faut faire appel à un drainage souterrain à partir de nappes en amont. C'est le cas pour la nappe littorale, surtout le long de la côte Ouest, et pour une partie de la nappe générale.

CONDITIONS GEOLOGIQUES

On peut admettre à priori l'existence de nappes aquifères, si les conditions d'alimentation sont réalisées, dans les horizons perméables reposant sur un niveau imperméable ; il y a donc lieu d'étudier tout d'abord

quels sont les "réservoirs" aquifères possibles et sur quels horizons imperméables ils peuvent se trouver (il n'existe pas en français d'équivalent du mot anglais "retainer"). Mais en fait l'alimentation n'est jamais telle que la simple condition précitée suffise et les nappes aquifères se localisent de préférence là où la structure est favorable à une accumulation d'eau, c'est-à-dire, d'une façon générale, dans les points bas, puisque l'eau a tendance à migrer conformément aux lois de la pesanteur (sauf parfois dans le cas des eaux thermales).

L'analogie avec les conditions d'existence des gisements de pétrole a été maintes fois relevée ; la différence essentielle tient au sens opposé du déplacement de l'eau dans les roches perméables, la "couverture" des gisements de pétrole est donc remplacée par le substratum imperméable des nappes aquifères ; il est d'autres différences dont on ne tient souvent pas assez compte : tandis que les gîtes pétroliers sont, le plus souvent, formés depuis longtemps et, en quelque sorte, fossiles, les nappes aquifères sont alimentées de façon quasi-continue et les eaux sont constamment en mouvement à l'intérieur même de leur gisement (à la très rare exception près des nappes prisonnières, immobiles) ; elles peuvent par conséquent passer d'un "piège" à un autre, changer de composition chimique, se développer ou tarir, en fonction des possibilités offertes par l'alimentation, la perméabilité des terrains et leur structure ; enfin, certaines nappes thermales mises à part, les pressions de gaz n'interviennent pas dans les déplacements de la nappe.

RESERVOIRS AQUIFERES. - Il est courant de classer les roches, suivant la nature des vides, en roches poreuses présentant une perméabilité d'interstices et en roches fissurées ou cavernueuses, les eaux qui s'y trouvent formant dans le premier cas une nappe aquifère sensu stricto, dans le second cas un réseau aquifère. Il existe certes des différences notables entre les cas extrêmes, surtout en ce qui concerne l'hydrodynamique, mais, dans la pratique, il est souvent bien difficile de classer un terrain dans l'une ou l'autre de ces catégories, d'abord faute de mesures, ensuite parce que bien des roches poreuses sont également fissurées ; enfin, l'hétérogénéité des formations continentales, comme dans notre région le Néogène Continental, contenant cependant une nappe aquifère unique, interdit toute classification rigoureuse. Nous grouperons donc ici toutes les formations perméables en précisant si possible le caractère dominant de perméabilité, et le terme nappe continuera à être employé dans son sens le plus large.

Le socle précambrien présente une perméabilité notable dans sa zone superficielle d'altération, dans la mesure où cette altération a provoqué une arénisation ou une fissuration ; dans bien des cas, il s'agit d'une kaolinisation entraînant au contraire une diminution de la perméabilité. L'épaisseur de cette zone est très variable : nulle dans certains cas (Imangoro, Sakaomby),

elle peut atteindre ailleurs plus de 20 mètres (Tsimilofo I, Lovokarefo IV). D'autre part, elle n'est pas forcément au toit du socle ni continue dans les sondages, certains bancs gneissiques s'altérant plus facilement que d'autres.

Les grès faiblement cimentés de l'Isalo, parfois grossiers, constituent un excellent réservoir possible ; l'épaisseur de cette formation la rend particulièrement intéressante du point de vue aquifère. Les calcaires du Jurassique moyen, peu fissurés et les grès du Crétacé infra-basaltique présentent des perméabilités variables, mal étudiées d'ailleurs.

La perméabilité des coulées volcaniques (coulées sénoniennes de l'Ouest de Betioky et coulées du Massif de l'Androy) est fonction de leur fissuration, qui semble importante pour les premières, très variable pour les secondes, altérées aux affleurements mais imperméables dans les sondages : à Ankatrafay il y a une zone d'altération argileuse sur 1,50 mètres d'épaisseur, les fissures étant remplies au-dessous par des dépôts secondaires de calcite et silice. A Ambatolahy toutes les fissures sont également colmatées par des calcaires.

Tous les niveaux calcaires du sédimentaire marin sénonien et tertiaire présentent une perméabilité par fissures, qui paraît particulièrement importante dans ceux de l'Eocène à Alvéolines, où les phénomènes de dissolution sont nombreux (zone des avens) ; il y existe des possibilités de circulation de l'eau en réseaux (d'ailleurs prouvées par la présence assez fréquente d'un poisson cavernicole aveugle : Typhleotris madagascariensis PETIT dans des puits et avens).

Le Néogène continental a une perméabilité extrêmement variable, suivant les niveaux ; elle est très médiocre pour les grès argileux où il existe cependant fréquemment des fissures aquifères (cas constaté à Tokoindolo, dans la dépression d'Ankazomanga et dans la région de Beloha), meilleure dans les carapaces calcaires siliceuses ou ferrugineuses, souvent fissurées, maximum dans les sables grossiers et conglomérats.

Dans le Quaternaire, les sables littoraux à graviers des sondages d'Ankitry et Ambovombe montrent une excellente perméabilité d'interstices, tandis que les formations dunaires ont un comportement assez variable vis-à-vis de l'eau : lorsqu'elles sont sableuses, la perméabilité dépend de la dimension des grains siliceux qui peuvent être extrêmement fins (sondage Erada par exemple) ; dans le cas des grès tendres à ciment calcaire, il y a une faible perméabilité d'interstices mais, par contre, la roche est souvent fissurée et il y a possibilité de phénomènes de dissolution localisés. Le fait est particulièrement net dans les nombreux sondages côtiers qui ont atteint l'eau dans ces formations cimentées bien au-dessous du niveau piézométrique normal de la nappe littorale (niveau 0), ou qui sont restés entièrement secs, faute de fissures, au-dessous du niveau de la mer.

Nous avons vu, à propos de l'alimentation des nappes, que les formations superficielles sableuses ont une bonne perméabilité, sauf pour certains sables roux très argileux ; celle des alluvions est très variable, suivant la proportion d'argile, les alluvions sableuses grossières des lits mineurs constituant d'excellents chenaux de perméabilité.

NIVEAUX IMPERMEABLES. - Les formations imperméables peuvent constituer le mur des nappes normales, mais aussi le toit des nappes captives ; remarquons d'autre part que l'imperméabilité "relative" d'un horizon par rapport aux couches sus-jacentes peut suffire pour qu'il existe une nappe aquifère, sous réserve que l'alimentation de cette nappe soit supérieure aux pertes d'eau à travers son mur ; le cas est réalisé en particulier pour beaucoup de nappes alluviales ; le meilleur exemple dans la région étudiée est celui de la nappe de la Linta, entre le confluent de la Manakaralahy et l'aval d'Ankazontaha, où l'eau se trouve dans des alluvions très perméables au-dessus des calcaires gréseux sénoniens faiblement fissurés.

Le socle précambrien inaltéré constitue le mur de toutes les nappes possibles ; la probabilité de fissures aquifères profondes est extrêmement faible. Les roches très compactes de la Sakoa et de la Sakamena, en majorité schisto-argileuses, sont imperméables dans l'ensemble, avec cependant possibilité de faibles circulations dans des niveaux gréseux. Les lentilles argileuses incluses dans les grès de l'Isalo sont d'excellents niveaux imperméables, mais il faut dire que l'on connaît actuellement fort mal leur extension.

Dans le sédimentaire anté-sénonien on ne connaît que de minces lits marneux dans le Jurassique moyen, quelques niveaux marneux et argileux dans la partie inférieure du Crétacé infrabasaltique. Les niveaux imperméables sont beaucoup plus nombreux dans le Sénonien supérieur et l'Eocène : marnes d'Ejeda, marnes à Nummulites de la base de l'Eocène à Alvéolines, marnes à Huîtres, niveaux marneux du sommet de la série (Oligocène-Miocène ?) ; dans la plupart des cas cependant, ces niveaux ont une faible puissance et leur valeur comme murs possibles de nappes est douteuse, du fait de l'existence probable de petites failles ou cassures.

Le Néogène continental contient des niveaux marneux et argileux, mais comme pour les réservoirs, il n'est nulle part possible d'en préciser l'extension. Ces niveaux se comportent tantôt comme murs de nappes (cuvette d'Ankazomanga, région d'Andranoabo), tantôt comme couverture de nappes en charge (Ambaliandro). Dans le Quaternaire, les seuls niveaux imperméables sont les vases marines et surtout les argiles et marnes des formations lacustres, qui portent des nappes très importantes du point de vue pratique.

Il y a lieu de rappeler ici que des changements de facies sont possibles dans tous les niveaux, en particulier dans la série sédimentaire du Nord-

Ouest de la région. Le sondage de Tuléar a montré une série crétacée et éocène entièrement marneuse qui, si elle se prolonge au Sud, peut modifier considérablement l'écoulement des nappes (possibilité de nappes artésiennes).

Enfin, à proximité du rivage, il n'est pas absurde de comparer les terrains saturés par l'eau de mer à des niveaux relativement imperméables vis-à-vis de l'eau douce des nappes qui est partiellement retenue au-dessus.

PIEGES AQUIFERES.— Les conditions d'alimentation étant supposées réalisées, une nappe aquifère peut exister dans tout réservoir superposé à un niveau imperméable ; l'ensemble des deux niveaux constitue ce qu'on peut appeler un "piège lithologique" (nous préférons cette expression à celle souvent employée de piège stratigraphique, car elle ne préjuge pas de l'origine de la superposition). Dans le cas le plus simple d'un réservoir de perméabilité homogène reposant sur un lit imperméable horizontal, les eaux de la nappe s'écoulent latéralement dans toutes les directions à partir de la zone d'alimentation ; si le piège est incliné, elles suivent la direction de la plus grande pente du mur ; s'il est horizontal mais si la perméabilité du réservoir est variable, la nappe s'écoule de préférence dans le sens de la plus grande perméabilité ; dans le cas général d'un piège incliné et non homogène le sens d'écoulement est une composante des directions précédentes.

Imaginons maintenant une série géologique parfaitement régulière comportant plusieurs pièges lithologiques superposés, dans une région alimentée uniquement par les pluies. Si cette série est parfaitement horizontale la seule nappe possible se trouvera dans le piège supérieur (nappe phréatique) et les réservoirs au-dessous seront secs, faute d'alimentation. Si la série est monoclinale et recoupée par la surface topographique, une alimentation des pièges inférieurs sera possible à partir des affleurements des réservoirs et on aura plusieurs nappes superposées indépendantes les unes des autres (nappe phréatique et nappes profondes).

Lorsque, pour une raison quelconque, la continuité vers l'aval des réservoirs aquifères est interrompue pour tous les pièges (changement de faciès par exemple), il y aura émergence de la nappe phréatique à la surface du sol, tandis que les nappes profondes rempliront chaque réservoir jusqu'à son toit (mur de la nappe immédiatement au-dessus) et deviendront captives. Si les réservoirs ne sont interrompus que par une formation relativement imperméable, la vitesse de circulation des nappes sera simplement ralentie ; dans le cas particulier d'une série plongeant vers la mer, la nappe supérieure formera une nappe littorale type au-dessus du biseau d'eau salée et les nappes profondes ne pourront avoir que des exutoires sous-marins.

Dans le cas inverse où ce sont les niveaux imperméables des nappes qui sont interrompus vers l'aval, chaque nappe devient perchée ou suspendue

par rapport aux nappes inférieures et les eaux souterraines se déversent jusqu'au dernier niveau imperméable pour former la nappe de base, ou la suralimenter si elle existait déjà.

A partir de ce schéma évidemment très caricatural par rapport aux conditions réelles, on peut rendre compte de la plupart des phénomènes se produisant dans une série tectoniquement régulière mais inégalement perméable, aussi bien verticalement que latéralement, dans la mesure naturellement où les données sont connues. On voit que le nombre de combinaisons possibles, lorsque la série comporte plusieurs pièges lithologiques, des lacunes et variations latérales de facies, est pratiquement illimité.

Dans ce qui précède, nous avons supposé une alimentation illimitée, mais ceci est tout théorique ; de plus, les pièges lithologiques ne sont jamais rigoureusement tabulaires comme dans le schéma ci-dessus. Les eaux ne remplissent donc que très rarement l'ensemble des réservoirs et s'accumulent de préférence dans les points bas de pièges lithologiques qui deviennent alors des "pièges structuraux".

On a décrit un grand nombre de types de pièges structuraux aquifères, qui peuvent presque tous se grouper en deux catégories suivant l'origine de la structure. Celle-ci peut avoir été formée après le dépôt des roches constituant le réservoir ; on a alors un "piège tectonique" ; si la forme du niveau imperméable existait avant le dépôt des roches du réservoir, le piège peut être appelé "morphologique".

Parmi les pièges tectoniques les plus fréquents on peut citer ceux qui sont dus aux plissements (nappes synclinales), aux failles (provoquant souvent des émergences de nappes captives, nappes de fossés tectoniques), au volcanisme (nappes de barrage par dykes), à la subsidence ; dans ce dernier cas, la formation de la structure peut être contemporaine du dépôt du réservoir et ce type de piège est à la fois tectonique et morphologique ; de nombreux pièges artésiens rentrent dans cette catégorie.

Les pièges morphologiques résultent essentiellement de l'enfouissement d'une topographie ancienne sous des sédiments ou des formations volcaniques perméables ; à cette catégorie appartiennent les accumulations d'eau dans des vallées ou bassins, fermés ou non, d'un socle ancien, les nappes sous-lacustres et, dans la plupart des cas, les nappes alluviales ; un cas particulier est constitué par les nappes de barrage, où le réservoir se trouve sur une partie seulement du niveau imperméable préexistant. Les pièges formés par des lentilles ou biseaux perméables dans des formations de piedmont et, dans la mesure où les déformations sont originelles, beaucoup de pièges dans les bassins sédimentaires continentaux doivent être également classés dans cette catégorie.

Logiquement, l'exposé qui précède devrait être illustré ici par des exemples choisis dans le Sud de Madagascar, mais, faute de données, beaucoup de

nappes dans cette région ne peuvent actuellement être classées de façon certaine ; il est donc préférable de les étudier d'abord, pour discuter ensuite leur nature. D'autre part, une nappe se définit par la continuité de sa surface piézométrique (water table) et peut se trouver successivement dans des pièges différents suivant les régions. La première donnée connue pour une nappe est très généralement la nature et l'âge du réservoir qui la contient, ce qui nous servira provisoirement à les distinguer, sauf en ce qui concerne la nappe dite générale, qui se trouve dans différents niveaux, mais dont la continuité est assez bien établie maintenant.

SYSTEMES AQUIFERES

I - LES NAPPES LOCALES

NAPPES SUSPENDUES DANS LE SOCLE

Nous ne connaissons dans le socle cristallin (Précambrien et massif de l'Androy) que de rares exemples de nappes perchées par rapport à la nappe générale de la zone d'altération, la topographie du socle précambrien se prête d'ailleurs mal à la formation de telles nappes.

NAPPE DE TSIMANDAHA, A ANTANIMORA. - Le poste administratif d'Antanimora (X = 145 ; Y = 321) est bâti sur des gneiss formant une crête orientée Nord légèrement Est, correspondant à la schistosité des roches. Le thalweg Tsimandaha, à l'Est immédiat de la ville, débute 3,5 kilomètres au Sud dans une dépression en fond de bateau dont le fond est occupé par des arènes et des alluvions sableuses assez grossières. La dépression est en partie fermée au Nord par un banc rocheux, complété par un barrage maçonné.

Une petite nappe aquifère se trouve dans les arènes et alluvions, à une profondeur n'excédant pas 2 mètres ; elle est exploitée par quelques vovos⁽¹⁾, est utilisée pour les cultures et alimente la petite retenue du barrage. Du fait de sa position topographique, la seule alimentation possible est limitée à la pluie tombant sur le bassin versant, dont la superficie est d'environ 1,5 km². La moyenne annuelle des pluies à Antanimora est de 560 mm, mais l'examen des données mensuelles montre que l'alimentation directe est impossible d'Avril à fin Septembre, et maximum en Décembre et Janvier ; en admettant un déficit évapo-transpiratoire d'environ 400 mm par an, la nappe de Tsimandaha pourrait recevoir annuellement 240.000 m³ d'eau.

(1) - Un vovo est un simple puits indigène, sans maçonnerie ni boisage, généralement en forme d'entonnoir.

Mais les sables et arènes qui contiennent la nappe n'occupent qu'une superficie d'environ 100.000 m^2 , ce qui, en supposant une épaisseur moyenne de 5 mètres et une capacité de rétention de 10 à 20 %, limite les réserves possibles entre 50.000 et 100.000 m^3 . L'excès d'eau s'écoule dans le thalweg, débordant le barrage, pour alimenter une seconde nappe à l'Est immédiat d'Antanimora, exploitée par puits, puis la nappe alluviale de la rivière d'Antanimora (Andranobe).

Le niveau de la nappe et son débit varient naturellement très fortement, en fonction des pluies. L'alimentation doit être nulle certaines années, mais la nappe conserve toujours un peu d'eau. Du point de vue chimique, les eaux se concentrent légèrement par évaporation ; en Mai 1958 on a noté les chiffres suivants : $0,12 \text{ g/l}$ de chlorures et 53 degrés hydrotimétriques⁽¹⁾ dans un vovo à 700 mètres en amont du barrage, $0,18 \text{ g/l}$ et 25° dans la retenue du barrage.

La nappe de Tsimandaha n'a d'intérêt pratique que pour l'alimentation en eau d'Antanimora. Immédiatement au Sud entre les crêtes gneissiques du Vohidolo et de l'Ambindavato, le thalweg Sakaomby contient peut-être une petite nappe du même genre, non étudiée.

MASSIF VOLCANIQUE DE L'ANDROY. - Le seul exemple connu de nappe aquifère perchée dans la partie méridionale du massif volcanique de l'Androy est représenté par le petit point d'eau de Ianinaky ($X = 140$; $Y = 341,6$). Il s'agit d'un simple suintement réputé permanent, sur le flanc Sud-Ouest du sommet Vohipotsy, constitué par des rhyolites. La fissure aquifère est masquée par une terre noire alluviale ; elle ne peut être alimentée que par les pluies, sur une surface très réduite. En Mai 1956, l'eau titrait $\text{NaCl } 0,24 \text{ g/l}$ et DHT 13° .

NAPPES DANS LE KARROO

On a vu que les roches constituant les groupes de la Sakoa (en dehors d'ailleurs de la zone étudiée) et de la Sakamena sont, dans l'ensemble, imperméables, tandis que les grès de l'Isalo sont susceptibles de former d'excellents réservoirs aquifères. Nous ne connaissons qu'un seul point d'eau pouvant correspondre à une nappe dans la Sakamena ; dans l'Isalo une nappe de base importante est prévisible et il existe plusieurs nappes suspendues exploitées.

(1) - Sauf indication spéciale, les chlorures sont exprimés en chlorure de sodium (NaCl) et la dureté totale est exprimée en degrés français (DHT). Toutes les mesures citées sans nom d'auteur ont été effectuées sur place.

AMBATOMAINTY. - Un sondage a été effectué (Anonyme, 1949) au lieu dit Ambatomainty, 6,5 km au Nord-Ouest d'Andranoabo, près de l'ancienne route d'Ejeda à Betioky (X = 231 ; Y = 194,3). Au-dessous de 12,2 mètres d'argiles bario-lées néogènes, il a touché, sans le traverser, un grès qui, d'après l'altitu-de du sondage et celle du contour du Néogène, très proche, doit correspondre au groupe de la Sakamena. Une nappe se trouve dans ces grès, en charge sous les argiles néogènes et son niveau piézométrique dans le sondage est à 3 mè-tres sous le sol.

Les essais de débit, dans le sondage de 140 mm de diamètre, ont donné les résultats suivants(1).

900 litres/heure pour un rabattement de 0,30 m		
2400	-id-	2,60 m
3600	-id-	2,90 m

En ce qui concerne la potabilité chimique, deux analyses ont été fai-tes par l'Institut Pasteur, Tananarive, montrant une nette augmentation de la minéralisation après 3 heures de pompage, mais on peut se demander si le pre-mier prélèvement ne contenait pas des eaux étrangères à la nappe (eaux de fo-rage par exemple). Les principaux chiffres pour le prélèvement après pompage sont :

DHT	308°
Extrait sec à 100°.....	10.690 mg/l
Perte au rouge.....	4.974 mg/l
ClNa	2.977,6 mg/l
Phosphates.....	6 mg/l

L'eau est donc fortement minéralisée, mais encore utilisable pour l'abreuvement pastoral.

L'origine de cette nappe est assez énigmatique, car la tectonique du groupe de la Sakamena (pendage Ouest régulier ici) sous le Néogène discordant ne se prête guère à une mise en charge de la nappe. L'hypothèse la plus vrai-semblable est qu'il s'agit d'eaux provenant d'une nappe dans le Néogène con-tinental, incluses ici dans un banc gréseux de la Sakamena, faute de perméabi-lité dans les terrains supérieurs ; au point de sondage, la nappe y serait prisonnière et pratiquement immobile, ce qui expliquerait sa minéralisation élevée et le fait qu'il n'existe pas de sources le long du contact Néogène-Sakamena, immédiatement au Nord.

Trois cents mètres à l'Ouest du sondage, cinq vovos au fond d'une cu-vette formant mare en saison des pluies exploitent une nappe dont le niveau

(1)- Pour éviter toutes confusions et faciliter les comparaisons, tous les chiffres de débits sont donnés en litres par heure..

piézométrique, à un mètre sous le sol, correspond au niveau de l'eau dans le sondage. La morphologie et les photographies aériennes montrent que ce point d'eau se trouve exactement sur le tracé d'une petite faille ; il y a donc tout lieu de penser qu'il s'agit d'une remontée naturelle, à la faveur de la faille, des eaux de la nappe trouvée dans le sondage ; toutefois, l'eau est très peu minéralisée : 0,24 g/l de NaCl, DHT 12° en Août 1956.

NAPPES PROFONDES DANS L'ISALO.— La superposition des grès peu cimentés de l'Isalo aux schistes, argilites et grès compacts de la Sakamena constitue un excellent piège lithologique et, compte tenu de la pluviosité relativement élevée (plus de 600 mm par an) et de l'étendue de la zone d'affleurement, il est extrêmement probable qu'il existe une très importante nappe aquifère à la base du groupe de l'Isalo, qui pourrait avoir une grande extension vers l'Ouest (sous réserve de changements de facies). Aucune recherche n'a jusqu'ici été faite dans ce sens ; il faut remarquer que la profondeur doit devenir rapidement prohibitive sous le plateau calcaire Mahafaly.

Les sondages de Bezaha, sur la rive droite de l'Onilahy, 28 kilomètres au Nord-Est de Betioky, effectués en 1951 et 1952 par la Société des Pétroles de Madagascar ont montré l'existence d'importantes nappes profondes dans l'Isalo⁽¹⁾. Un premier sondage a traversé des sables assez fins avec quelques lits d'argilites bariolées, particulièrement entre 38 et 48 mètres de profondeur ; il y a eu jusqu'à 168 mètres six venues d'eaux artésiennes, les principales étant à 48 mètres et entre 106 et 160 mètres ; le débit total était de l'ordre de 800.000 litres/heure, pour un forage de 440 mm de diamètre. Un second sondage, tubé pour traverser ces nappes, a rencontré une nouvelle venue artésienne à 320 mètres, avec un débit de 400 à 500.000 litres/heure. Un troisième forage, de petit diamètre, a été effectué en 1957 au milieu du village pour son alimentation en eau.

Des sources connues depuis longtemps se trouvent près de Bezaha et plus au Nord (Ambarinakoho) ; elles jalonnent une zone de faille dans la vallée de la Teheza et correspondent certainement à des nappes profondes de l'Isalo identique à celles des sondages car les eaux ont presque exactement la même composition chimique (Analyses ROSE) : Résidu sec : 116 mg/l, résidu fixe : 64; Cl : 7, DHT : 7°, pour ne citer que les principaux chiffres dans le premier sondage. La température de l'eau (40° au sondage, 35° pour les sources) doit être attribuée à la profondeur de la nappe principale, qui est peut-être la nappe de base de l'Isalo n'apparaissant à Bezaha qu'à la faveur de fractures ; la limite supérieure du groupe de la Sakamena est à 2080 mètres de profondeur dans le second sondage.

(1) — BESAIRIE H., 1951. — Le sondage BW 1 de la S.P.M. à Bezaha et son enseignement hydrogéologique. Arch.Serv.Géol.Madag. A.443.

NAPPES PHREATIQUES DANS L'ISALO.— En dehors des puits dans la nappe phréatique de Betioky, décrite plus loin, on connaît une quinzaine de points d'eau dans la zone étudiée, qui correspondent à des nappes perchées dans les grès de l'Isalo sur des niveaux d'argilites ; ces points d'eau sont irrégulièrement répartis sur une centaine de kilomètres carrés depuis 7 kilomètres au Nord de Betioky jusqu'à Ambatry au Sud.

Les griffons des sources correspondant à l'affleurement d'un niveau argileux ne sont pas visibles car ils sont masqués par une terre noire sablo-argileuse cultivée en rizières à Andranomiboaka Sud et Ambatomena, au Sud de Betioky. L'eau n'apparaît que dans quelques trous et le débit n'est évidemment pas mesurable ; compte tenu de la dimension des zones cultivées, il ne doit guère dépasser quelques centaines de litres à l'heure. A Anadabo, au Nord de Betioky, on devine une couche argileuse grise à la base d'une petite côte formée par des grès, et des suintements d'eau apparaissent sur quelques centaines de mètres. Ces sources ont des eaux très faiblement minéralisées : 0,07 g/l à 0,15 g/l de chlorures, 1^{re} à 4^{es} DHT (celles de la source Anadabo sont concentrées par évaporation, avec 22^{es}).

Dans les vovos, l'eau est à moins de trois mètres sous le sol en saison sèche ; elle est à 14 mètres dans le puits d'Ankilimary. La minéralisation, toujours faible, paraît dépendre essentiellement de l'utilisation : NaCl 0,04g/l et DHT 6^{es} au vovo d'Ambatry, seul utilisé par un gros village depuis l'effondrement des puits, 0,18 g/l et 26^{es} dans le puits d'Ankilimary, exploité par une famille. Un essai de débit dans ce puits en Septembre 1957 n'a montré qu'un débit de 60 l/h pour une dénivellation de 0,18 mètre.

Ces nappes sont surtout exploitées, indirectement, dans les alluvions sableuses des thalwegs, qu'elles alimentent, où la nappe est encore moins profonde, dans un sol plus meuble, avec le gros avantage d'un débit plus important du fait de la meilleure perméabilité. Ces vovos se trouvent dans les hauts cours de la Menarandroy, de la Mahavoky et de la Lomaka qui peuvent, en saison des pluies, présenter un écoulement temporaire. Les eaux de sous-écoulement⁽¹⁾ sont tout à fait comparables à celles des sources et vovos avec moins de 0,12 g/l de chlorures et moins de 12^{es} hydrotimétriques (Août 1956), tandis que celles des mares formées dans les creux des thalwegs sont nettement concentrées (0,46 g/l NaCl et 67^{es} à Betapoaka, par exemple).

Il est pour le moment impossible de délimiter les diverses nappes correspondant à ces points d'eau et on ne connaît nulle part l'épaisseur de leurs murs argileux. L'altitude du niveau de l'eau décroît de 325 mètres environ à Ambatry, à 170 mètres environ à Betapoaka, mais ceci est simplement conforme

(1) — Ce terme nous paraît préférable au mot anglais "underflow" puisqu'il est exactement équivalent. Nous nous refusons à employer le terme "inferoflux" qui est un néologisme inutile.

à la pente topographique. L'amplitude des variations saisonnières paraît d'environ 1 mètre et, aux dires des habitants, le débit des sources serait peu variable.

Compte tenu de la topographie et de l'absence de tout écoulement de surface, on ne peut envisager pour ces nappes qu'une alimentation directe ; la moyenne annuelle des pluies à Betioky est de 641 mm, répartis en 57 jours par an, dont une quarantaine de jours où la hauteur des pluies dépasse 10 mm ; le minimum observé est de 400 mm en 1948, le maximum de 1307 mm en 1953 ; tous ces chiffres sont compatibles avec une alimentation annuelle régulière, et les formations superficielles sableuses ont une excellente perméabilité.

NAPPE DE BETIOKY.— La nappe phréatique de Betioky fait partie du groupe précédent, mais on dispose d'une dizaine de puits productifs sur une surface inférieure à un kilomètre carré, ce qui permet une étude plus détaillée. Elle a été reconnue avant 1910 par le Lieutenant BLANC (CARLE, 1910) et elle est exploitée régulièrement depuis pour l'alimentation en eau de la ville ; les dernières études sont celle de H. BESAIRIE en 1944 et la nôtre en 1956-1958.

Les puits, numérotés de 1 à 13, les trois derniers étant entièrement comblés, figurent sur le plan au 1/5.000, planche XI⁽¹⁾. En Août 1956, la profondeur de l'eau sous le sol varie de 2,80 mètres au Nord de la ville (puits n°1) à 18,0 mètres à l'extrême Sud (puits n°6). Un nivellement précis permet de tracer avec une bonne approximation les courbes isopiézométriques à la même époque ; la nappe s'écoule depuis l'Est de la ville (eau à 243,4 mètres d'altitude au puits n°5) vers le Nord-Ouest puis le Nord-Nord-Ouest (cote 234,1 au puits n°1), avec une pente moyenne de 1,5 %, de même sens mais inférieure à la pente topographique. Les puits 6 et 7 suggèrent une possibilité d'écoulement secondaire vers le Sud.

Nous ne disposons pas de relevés en saison pluvieuse permettant de chiffrer les variations saisonnières de la surface piézométrique qui, d'après les habitants, seraient importantes. Un fait beaucoup plus grave est la baisse anormale du niveau de l'eau qui a eu lieu par rapport à 1944. La comparaison des mesures de H. BESAIRIE en Août 1944 et des nôtres en Août 1956 montre un approfondissement du niveau statique qui atteint 4 à 5 mètres dans la partie Sud-Est de la ville (c'est-à-dire à l'amont de la nappe) et 0,60 à l'extrême Nord. On ne peut invoquer des erreurs de mesure de cet ordre, ni des variations saisonnières qui n'ont pas cette amplitude, ni une période pro-

(1) — Le plan primitif de ce mémoire prévoyait l'étude de la nappe générale avant celle des nappes locales ; la numérotation des planches, établies avant rédaction, n'est donc pas conforme à l'ordre du texte. Le lecteur voudra bien nous en excuser.

longée de sécheresse entraînant une absence temporaire d'alimentation, car l'examen des données météorologiques montre que dans la période de 5 années précédant chacune des séries de mesure, la moyenne des pluies est approximativement la même. D'autres faits témoignent également d'un appauvrissement progressif de la nappe aquifère : diminution du débit des puits, disparition des rizières autrefois irriguées au Nord de la ville, à partir des sources du thalweg Andranobe, actuellement constamment taries, assèchement des marais qui, si l'on en croit les cartes anciennes, existaient dans la région.

Faute de relevés réguliers, qui permettraient de connaître au moins la date du début du phénomène, nous ne sommes pas en mesure d'expliquer ce tarissement. Il est difficile d'imaginer une perte naturelle de la nappe en profondeur à travers son mur argileux (dont nous ne connaissons d'ailleurs ni la profondeur, ni la puissance, ni l'extension) et la première hypothèse, qu'il faudrait d'ailleurs vérifier au plus tôt, ce qui serait facile, est une perte d'eau artificielle par un ou plusieurs puits ayant crevé le mur de la nappe. Les soupçons se portent principalement sur le puits n°9 (puits du marché), foncé en 1948 sans contrôle géologique, où la hauteur d'eau est de 5,60 mètres, ce qui est inhabituel et probablement supérieur à la puissance de la nappe, et dont le débit, apparemment beaucoup plus fort que celui des autres puits de la ville s'expliquerait assez bien par l'afflux d'eau de la nappe provoqué par la perte.

Quoi qu'il en soit, la baisse de niveau de la nappe n'a pas eu de répercussion sur la qualité de l'eau, ce qui ne serait pas le cas s'il s'agissait d'un défaut d'alimentation. En 1956 comme en 1944, les essais de salinité et dureté montrent des eaux extrêmement douces, tout au moins les plus douces du Sud de Madagascar, avec des teneurs variant entre 0,03 g/l de chlorures et 1^{re} hydrotimétrique pour le puits n°6 et 0,11 g/l de chlorures et 18^{de} hydrotimétriques pour le puits n°1 (mesures Août 1956). Avec quelques exceptions, il semble qu'il y ait une légère augmentation de la dureté totale de l'amont vers l'aval de la nappe. Une analyse sur un prélèvement de Mai 1956 dans le puits n°9 (COMBEUIL) conclut à une potabilité chimique satisfaisante. Nous n'avons aucune donnée sur la potabilité du point de vue bactériologique, qui est sans doute moins bonne car la nappe n'est absolument pas protégée contre les pollutions dues à la ville au-dessus.

Un problème non résolu, que nous retrouverons à propos de plusieurs nappes du Sud, est celui de la présence de nitrates en quantités importantes dans les eaux de la nappe de Betioky. R. de ROBILIARD (1949) a signalé, suivant les puits, des teneurs en NO_3 de 87 , 156 , 170 et 202 mg/litre. L'importance même de ces chiffres suffit à éliminer toute hypothèse d'erreur d'analyse (une vingtaine d'analyses sont d'ailleurs données d'autre part) et on peut vérifier facilement par la comparaison des milliéquivalents des radicaux acides et basiques que le pourcentage d'erreur est très faible. Cependant les analyses récentes de potabilité chimique indiquent l'absence d'azote nitrique et l'ion NO_3 n'est pas dosé dans les analyses courantes, qui témoignent

souvent d'ailleurs de la non détermination d'un radical acide.

Trois essais de pompage ont été effectués à Betioky pour déterminer les débits des puits n°2 (très utilisé), n°8 (pratiquement abandonné) et n°6 (régulièrement utilisé). Les débits maxima, déterminés par la méthode de PORCHET sont très faibles :

N° 2 : 329 litres/heure pour un rabattement de 1,09 m le 12-10-57	
N° 6 : 110	-id- 1,33 m le 24-7-58
N° 8 : 108	-id- 1,41 m le 11-10-57

Les courbes de débit en fonction des rabattements, calculées d'après les courbes limnigraphiques, figurent planche XVII, les faibles valeurs du débit les rendent pratiquement linéaires et à moins que la nappe ait une grande épaisseur, ce qui est douteux, il n'y a aucun espoir d'augmenter sérieusement le débit par approfondissement des puits.

RECHERCHES ET AMELIORATIONS POSSIBLES POUR LES NAPPES DU KARROO..- La nappe d'Ambatomainy pose un problème local qu'il serait intéressant de résoudre par quelques petits forages (moins de 30 mètres) de part et d'autre de la faille signalée ; la formation aquifère n'a pas été traversée et il est possible que l'on trouve au-dessous ou à proximité des eaux moins minéralisées, plus utilisables.

Le problème des nappes profondes de l'Isalo, et surtout de la nappe de base exige au contraire de très gros moyens techniques avec en compensation la perspective d'obtenir des débits très importants, jaillissants, permettant l'irrigation en grand. Compte tenu de l'accroissement rapide vers l'Ouest de la puissance de la série sédimentaire, des recherches ne sont pas à envisager dans le plateau calcaire, sauf peut-être dans la partie orientale du couloir d'Itombona ; on risquerait d'ailleurs d'y trouver des eaux beaucoup plus minéralisées. Dans l'immédiat, un sondage de reconnaissance des nappes profondes est nécessaire à Betioky, pour tenter de résoudre le problème de l'alimentation en eau de la ville, pour laquelle la nappe phréatique n'est pas suffisante.

En ce qui concerne les nappes superficielles, leur recherche est facile, car la fréquence de bancs ou lentilles d'argilites est telle que l'on doit pouvoir trouver partout une nappe phréatique à moins de 30 mètres de profondeur dans la zone d'affleurement de l'Isalo ; par contre les débits ponctuels à espérer sont faibles et ne peuvent guère convenir qu'à l'alimentation humaine. En ce qui concerne les améliorations elles sont les mêmes que presque partout dans le Sud de Madagascar : captage convenable des sources, approfondissement des puits jusqu'au mur de la nappe, mais non au delà,

protection contre les pollutions à partir de la surface⁽¹⁾. Pour la nappe de Betioky, il y a une réelle urgence à examiner les causes du tarissement, pour y remédier s'il s'agit d'une perte artificielle. La question des teneurs en nitrates, toute théorique pour le moment puisque l'on n'a signalé aucun accident dû à leur présence, devra tôt ou tard être étudiée en détail, en même temps que la géochimie des eaux.

NAPPES DANS LE JURASSIQUE ET LE CRETACE INFRA-BASALTIQUE

Si la stratigraphie et la paléontologie de la série affleurant entre Betioky et le plateau d'Ianakatsamby sont bien connues, il n'en est pas de même de la géologie de détail, de la tectonique, compliquée ici par des failles, des propriétés aquifères des différents niveaux. En dehors des vovos dans le thalweg de la Menarandroy, où il est difficile de déterminer l'origine de l'eau, nous ne connaissons que quelques sources isolées.

SOURCES DANS LE JURASSIQUE.-- En dehors des sources de Ranomay et Andranomiboaka Nord, toutes deux thermominérales, les affleurements du Jurassique ne montrent que deux sources : celle d'Ampanenitse (Anontsy de la carte au 1/100.000) (X = 264,4 ; Y = 184), dans les calcaires à Polypiers, a ses griffons masqués par les éboulirs dans un petit ravin tributaire de la Menarandroy. Le débit en Août 1956 était de l'ordre de 15 m³/h et subirait peu de variations saisonnières ; la dureté de l'eau (50°) est normale pour une nappe dans les calcaires, la teneur en chlorure est de 0,46 g/l. Le périmètre d'alimentation possible est uniquement formé par les calcaires du massif de Maneva, au Sud-Est.

La source d'Andranontsefo (X = 268,8 ; Y = 181,8), à proximité de la Menarandroy, paraît correspondre à une faille entre le Bathonien et le Crétacé moyen. L'eau titre 0,44 g/l de NaCl. Un faible écoulement dans la Menarandroy est alimenté par des suintements analogues ; la minéralisation est plus forte, avec 1,20 g/l de chlorures et 110° hydrotimétriques ; le débit est de quelques litres par seconde.

(1)- Il y a là une série de petits problèmes, à étudier individuellement mais facile à résoudre. L'intérêt de leur solution ne paraît pas avoir été bien compris jusqu'ici. A titre d'exemple, nous dirons que, sur quelque 600 points d'eau dans le Sud, non comprises les mares et les rivières, il n'y en a pas 50 qui présentent des garanties suffisantes d'hygiène. Ceci dit, nous ne reviendrons plus dans ce mémoire, sur ces améliorations nécessaires mais négligées.

CRETACE. - La seule source connue dans le Crétacé est celle de Vohombe, au Sud du village Ianakatsamby, sur la berge Ouest d'un ruisseau. Elle correspond certainement à une nappe dans les basaltes et son eau est très douce : 0,04 g/l de NaCl, DHT 795. Seule une alimentation directe de la nappe est possible.

SOUS-ÉCOULEMENT DE LA MENARANDROY. - Depuis le vovo de Tsakopa, à l'Ouest d'Ambatry, jusqu'à son confluent avec l'Onilahy, la rivière Menarandroy est jalonnée par des vovos exploitant un sous-écoulement permanent. Nous avons vu que ce sous-écoulement était alimenté, dans le cours supérieur, par les nappes phréatiques de l'Isalo. A l'intérieur même des affleurements jurassiques, il est probable que ce sont les eaux de l'Isalo qui sont exploitées dans les alluvions jusqu'en aval d'Anontsy, car les salinités restent faibles : moins de 0,09 g/l de NaCl et de 24° hydrotimétriques. A partir de Ranonda, les nappes du Jurassique calcaire provoquent une augmentation de dureté (33° DHT à Antsakoamahitsy) qui diminue à nouveau dans le Crétacé gréseux (15° DHT à Befamata). D'autre part, il n'est pas impossible que les nappes supérieures de l'Isalo, par l'intermédiaire de ce sous-écoulement, contribuent à alimenter des nappes dans le Jurassique à l'Ouest de la rivière, entre Ampasindava et Ranonda.

RECHERCHES POSSIBLES. - Il est évident que nos connaissances hydrogéologiques sur cette région et ces niveaux sont nettement insuffisantes. La présence des sources décrites suffit à prouver que les lits imperméables peuvent être assez importants pour soutenir des nappes et que toutes les eaux tombant sur cette vaste surface perméable (calcaire, grès, basaltes) ne vont pas rejoindre les nappes de l'Isalo en profondeur. Il y aurait donc lieu en premier lieu d'étudier cette région du point de vue structural, pour rechercher les pièges tectoniques possibles.

D'autre part, à l'Ouest de la zone d'affleurements et au moins jusqu'à la faille probable limitant la cuvette d'Ankazomanga, ces niveaux doivent être accessibles à des sondages n'excédant pas 300 mètres (voir coupe 1, planche III^a) et les nappes peuvent se trouver en charge. Encore plus à l'Ouest on ne peut espérer de faibles profondeurs, mais la probabilité de changements de facies dans cette direction permet d'envisager un "coincement" des nappes dans des biseaux perméables donc une possibilité d'eaux artésiennes. Là encore le couloir d'Itombona serait une zone topographiquement favorable aux recherches, qui devraient naturellement être précédées d'une prospection géophysique détaillée.

NAPPES DANS LE SENONIEN
ET L'Eocene INFÉRIEUR

POINTS D'EAU.— Si l'on en juge par le très petit nombre de points d'eau que l'on peut attribuer à des nappes dans le Sémonien supérieur et l'Eocène inférieur, ces niveaux ne doivent pas présenter d'excellentes propriétés aquifères. Depuis le Nord du plateau d'Ianakatsamby jusqu'à la Linta, on ne peut citer en effet que le puits, actuellement tari, de Vohitsara, qui en 1944 donnait à 15 mètres de profondeur plus de 10 m³ par jour d'une eau titrant 1,0 g/l de NaCl et 90° hydrotimétriques ; le fond du puits est dans des calcaires compacts surmontés par des grès à grain fin probablement néogènes ; plus au Sud, dans la dépression d'Anena, les vovos d'Andranofoty (X = 222,4 ; Y = 190,4) montrent au fond des grès calcaires à glauconie, sous des grès argileux et ferrugineux néogènes ; l'eau est à 3,5 mètres au vovo Ouest en sécheresse et titre 27° hydrotimétriques ; à proximité, une mare quasi-permanente paraît peu supérieure au niveau de cette nappe. Dans l'axe de la même dépression, les deux puits dits de la Rochefortaise ont également atteint des calcaires ; l'eau est vers 5,5 mètres sous le sol, avec des variations saisonnières de l'ordre de 0,50 mètres ; en Août 1956 elle titrait NaCl 0,10 g/l, DHT 32°.

En fait, si ces puits ont bien atteint des calcaires, il est difficile d'affirmer que la nappe en provient ; au Nord-Ouest d'Ejeda, un essai de puits près de la mare Androbelo est resté sec dans des calcaires jaunes compacts, sous 8,5 mètres de marnes sableuses. Il peut donc s'agir de petites nappes locales dans les formations superficielles, les calcaires jouant au contraire le rôle de niveau imperméable. Faute de sondages il est impossible de conclure.

RECHERCHES POSSIBLES.— En ce qui concerne le Crétacé supérieur dans la zone comprise entre le socle cristallin et le plateau calcaire, d'Andranoabo à la Linta, on peut espérer atteindre une nappe de base au contact du socle, soit dans les calcaires gréseux, soit dans la zone d'altération des gneiss, si elle existe ici, ce qui n'est pas certain, puisque l'époque principale de pé néplanation doit être Oligocène ; quelques sondages résoudre la question. Plus au Nord, le Crétacé paraît stérile mais peut supporter une nappe dans l'Eocène inférieur calcaire. Au-dessus, H. BESAIRIE (1948-a, 1955-a) signale dans l'Eocène inférieur un niveau de marnes Nummulites affleurant sur les pentes Est du point géodésique Ianakatsamby et dans la vallée de l'Onilahy. Si ce niveau est continu et se prolonge vers le Sud-Ouest, il peut former le mur d'une importante nappe, disposant d'un vaste impluvium (plateau à l'Est de la cuvette d'Ankazomanga) ; il est normal, compte tenu des pentes Ouest que cette nappe n'apparaisse actuellement nulle part ; elle est peut-être responsable d'une partie de l'alimentation de la nappe d'Ankazomanga (voir cou-

pe 1, planche IIIa) et c'est dans cette région qu'il faudrait la rechercher en premier lieu, à l'Est de la faille d'abord, puis dans la cuvette et le couloir d'Itombona, où elle peut fort bien être artésienne. Plus à l'Ouest on est ramené au problème, déjà évoqué à propos du Crétacé infra-basaltique, de biseaux aquifères dans la zone de changements de facies probables.

NAPPES DANS L'Eocene A ALVEOLINES

On sait que les calcaires à Alvéolines du Lutétien ont une perméabilité importante par fissures, permettant une circulation karstique, reconnue au moins dans la région Ouest du plateau Mahafaly. La nappe qu'ils contiennent, en équilibre avec la nappe littorale du Quaternaire, sera étudiée plus loin, à propos de la nappe générale.

Dans la partie Nord et Est du plateau, les points d'eau sont peu nombreux dans la zone d'affleurement : les niveaux imperméables, rares et de faible puissance ne sont probablement pas continus ; l'alimentation directe des nappes est difficile ou impossible à l'Ouest de l'isohyète 400 mm qui traverse le plateau dans sa partie médiane, du Nord au Sud ; à partir du Sud de la cuvette d'Ilempo, la zone d'affleurement est très étroite, dans la falaise orientale du plateau et l'Eocène à Alvéolines est recouvert par les marnes à Huîtres qui font obstacle à une alimentation à partir du sommet du plateau.

REGION NORD. - Les vovos d'Andrambo (ou Iandrambaha) ($X = 236,9$; $Y = 172,4$) et d'Anakaraky ($X = 233,1$; $Y = 178,8$) paraissent situés, stratigraphiquement, vers la base de l'Eocène à Alvéolines. Dans le premier, au fond d'une dépression fermée, l'eau se trouve à 8 mètres de profondeur, dans des calcaires recouverts par 3 mètres de sables roux argileux ; après de grosses pluies, la nappe déborde et remplit une petite mare temporaire à proximité immédiate ; le débit paraît abondant et le vovo est très utilisé ; si, comme le pense H. BESAIRIE, l'eau provient des sables roux alimentés latéralement par une très faible circulation dans les calcaires, elle est en tous cas retenue dans les calcaires eux-mêmes, mais le mur de la nappe est inconnu. Le vovo Anakaraky est un simple trou au fond d'une mare temporaire, mais la permanence de l'eau qui ne serait jamais à plus de 4 mètres sous le sol et la présence dans les déblais de marnes jaune-vert, provenant du fond, indiquent qu'il s'agit d'une petite nappe perchée, à très faible débit.

Plus à l'Ouest, le vovo permanent de Ranomasy ($X = 233,4$; $Y = 168,3$) montre à 2,5 mètres sous le sol un lit de calcaire marneux gris-vert dont

les fissures sont aquifères ; un peu plus au Sud, Andriamanefy est un vovo temporaire dans une mare asséchée au milieu des calcaires. L'eau était à 4 mètres sous le sol en Juillet 1956.

Les prélèvements de Juillet-Août 1956 donnent les résultats suivants :

Andremba	: 0,16 de NaCl et 26° hydrotimétriques		
Anakaraky	: 0,05	-id-	50° -id-
Ranomasy	: 0,58	-id-	41° -id-
Andriamanefy	: 0,16	-id-	43° -id-

REGION SUD.— Sur le flanc Nord-Ouest de la vallée de la Linta, trois sources taries et une source permanente semblent correspondre, au contraire, à une nappe dans la partie supérieure de l'Eocène à Alvéolines. Celle d'Ananabindae (X = 183,1 ; Y = 192,5), au fond d'un thalweg encaissé, autrefois permanente, serait sèche depuis Mars 1956. Plus au Sud-Ouest les sources Bevava et Inisoly sont taries depuis plusieurs années et c'est seulement à Andraky (X=169,4 ; Y = 184,4), sur le côté Nord d'un thalweg très encaissé, que l'on voit un suintement d'eau, à très faible débit, mais permanent, dans des calcaires au-dessus d'une couche marneuse grise de 50 centimètres de puissance ; l'eau est assez mauvaise (0,75 g/l de chlorures et 65° hydrotimétriques) mais ce point d'eau est très fréquenté car il est le seul d'une très vaste région.

Il est difficile, dans l'état actuel de nos connaissances, d'expliquer la présence de ces sources ; il faut supposer soit un déversement du trop plein des nappes, puisque le pendage général des couches est vers l'Ouest, soit un léger bombement anticlinal au Nord-Ouest de la vallée de la Linta, inversant les pendages, soit, plus simplement, de petites causes locales (cassures). Le tarissement est dû à un défaut d'alimentation dans les dernières années et peut-être aussi à un colmatage des griffons par les éboulis.

Dans le lit même de la Linta, au Sud d'Andraky, le vovo Bealatsy (X = 163,9 ; Y = 185,4) est creusé dans les alluvions du lit mineur, à 8 mètres de la rive gauche, qui est ici très abrupte et constituée par l'Eocène à Alvéolines ; un faible débit, à 2 mètres de profondeur en Mai 1956, est exploité temporairement mais, d'après les habitants du village proche, on trouverait l'eau en saison sèche un peu plus profondément. Les derniers indices de sous-écoulement dans la Linta se trouvent 8 kilomètres en amont, au vovo très temporaire d'Etenetsa où l'eau titrait 23° DHT en Mai 1956 ; à la même époque la dureté de l'eau de Bealatsy était de 65° ; il est donc très probable que ce point d'eau est alimenté non par la rivière mais par une nappe perchée dans les calcaires éocènes, avec une émergence sous-alluviale.

RECHERCHES POSSIBLES.— Mis à part toujours le réseau karstique de la région occidentale, l'intérêt de recherches importantes dans l'Eocène à Alvéolines paraît mince du fait de la faible alimentation des nappes. A moins de découverte de structures tectoniques favorables dans la partie Sud du plateau Mahafaly, seule la région Nord où l'Eocène à Alvéolines affleure pourrait être étudiée par sondages, mais on ne peut nulle part espérer des débits très importants. Les sondages effectués en 1944 dans le couloir d'Itombona qui ont touché les calcaires (n° 7, 8 et 11) ont traversé de larges fissures non aquifères ou une alternance de calcaires et marnes sans aucune trace d'eau jusqu'à 26 mètres.

NAPPES DANS L'EOCENE A HUITRES

Sous la dénomination d' "Eocène à Huîtres" nous groupons toutes les formations affleurant à la partie supérieure du plateau Mahafaly, au-dessus des calcaires Lutétiens, quel que soit leur âge exact (Eocène à Miocène ?). On y connaît une vingtaine de points d'eau, dont dix permanents. La plupart sont concentrés dans la région de Beomby, 30 kilomètres à l'Ouest-Nord-Ouest d'Ejeda où ils font partie d'une même nappe, dite de Beomby-Lovo (du nom du principal village et du point d'eau le plus important) ; les autres, isolés, paraissent cependant correspondre au même niveau stratigraphique.

NAPPE DE BEOMBY-LOVO.— Un nivellement barométrique permet de rattacher les 14 points d'eau de la région de Beomby, répartis sur une surface d'environ 150 km², à une seule nappe, dont, en supposant qu'elle soit continue, on peut tracer les courbes isopiézométriques approximatives (planche XII). On constate que la nappe s'écoule du Nord-Est vers le Sud-Ouest avec une pente moyenne de 6 à 7 pour mille depuis Isatrapaly (eau à l'altitude 341m) jusqu'à une ligne de points d'eau au Sud-Ouest de Beomby (altitude de l'eau voisine de 275m) ; l'eau est au maximum à la profondeur de 10 mètres sous le sol au puits Ankallirano.

Points d'eau.— Les vovos d'Isatrapaly, Marofototra, et le puits d'Ankallirano sont situés dans ou près de la vallée Isatrapaly-Beomby, remblayée par des sables roux argileux. A Isatrapaly, on voit 3,5 mètres de calcaires reposant sur des marnes grises ; l'eau était à 3 mètres sous le sol en Août 1956 ; à Marofototra Ouest, sous 0,7 mètre de terre rouge, l'eau provient de calcaires marneux blancs, dont la base n'est pas visible ; la coupe du puits Ankallirano n'est pas connue, mais les déblais montrent des marnes vertes provenant vraisemblablement du fond ; il ne paraît pas que la vallée soit pour quelque chose dans la présence et l'alimentation de la nappe qui

n'est exploitée là qu'en raison de la moindre profondeur. En aval de Beomby, dans la même vallée, le vovo temporaire de Beranantany est également dans des calcaires ; celui de Iantohika est en tête d'un petit thalweg tributaire de la dépression principale, sur le tracé d'une petite faille.

Les sources du Sud de Beomby se trouvent sur le flanc Est d'une dépression à fond plat, en partie remblayée également par des terres rouges ; celles de Vombola, les plus hautes, tarissent vers Juillet chaque année ; celles d'Andoharano et Andranomasy sont permanentes, mais avec de très importantes variations du débit, au demeurant très modeste : 3 à 20 m³ par jour, soit 125 à 850 litres/heure pour chaque source. En saison sèche, l'eau est exploitée dans des vovos et entièrement utilisée ; en saison des pluies, elle disparaît dans les terres rouges de la dépression. A Andranomasy, on voit des éboulis calcaires sur un calcaire marneux blanc, avec une fissure aquifère du côté Nord du trou.

Un troisième groupe de points d'eau, au Sud-Est de Beomby, comprend les sources de Lovo, exploitées également en vovos en saison sèche, mais alimentant en saison des pluies un marais de 3 hectares environ, constituant le plus gros point d'eau de la région ; on a tenté, évidemment sans succès, de retenir par un barrage assis sur des calcaires, les eaux de ce marais, qui s'infiltrèrent à nouveau rapidement dans la nappe. Le vovo d'Avonapaha correspond à une petite faille mettant en contact des calcaires fissurés au Nord et des marnes grises au Sud ; l'eau déborde et forme une mare en saison des pluies. Celui d'Antsifitsy est une excavation semi-naturelle dans des calcaires, avec un peu d'eau dans des calcaires marneux à 2 mètres de profondeur. Ceux de Zantondrotsa, creusés dans le fond d'une mare asséchée, sont également temporaires.

Qualité des eaux.— En Août 1956, toutes les eaux ont été essayées pour la teneur en chlorure et la dureté totale. En ce qui concerne les chlorures on constate des variations sensibles suivant les points, de 0,10 g/l à Ankalirano à 0,52 g/l à Marofototra Ouest, sans que l'on puisse donner une explication simple de ces différences ; les duretés sont, par contre, assez homogènes, de 34° à Avonapaha à 44° à Antsifitsy, avec deux exceptions cependant : 25° à Lovo et 50° à Andoharano. On ne doit d'ailleurs pas attacher trop d'importance à ces chiffres car pour un même puits (Ankalirano) où on dispose de 5 mesures en deux ans, les teneurs sont très différentes : 0,06 g/l à 0,54 g/l de chlorures et 14° à 41° hydrotimétriques.

Variations.— Les variations saisonnières de la surface piézométrique sont mal connues ; d'après les habitants elles pourraient atteindre 2,50 mètres ; tout ce qu'on peut dire c'est que la nappe retrouve chaque année sensiblement le même niveau ; les deux seules mesures précises, au puits Ankalirano (après arrêt du puisage pendant plus de 12 heures) montrent un abaissement de 17 cm

seulement entre Septembre 1957 et Juillet 1958.

Débits.— Les débits des points d'eau doivent évidemment varier également suivant les saisons ; on a vu que pour les sources une estimation grossière donnait 125 à 850 litres/heure. Les deux essais de pompage effectués au puits d'Ankalirano montrent les débits suivants :

528 l/h pour un rabattement de 2 m le	6 Septembre 1957
211 l/h	-id- 1 m le 19 Juillet 1958

La comparaison des débits en tenant compte de la variation du niveau piézométrique, c'est-à-dire en calculant le débit pour une même profondeur du plan d'eau rabattu donne une moindre différence : 380 l/h en 1957 et 211 l/h en 1958 à 11,20 mètres sous le sommet de la margelle ; il faut d'ailleurs remarquer que le puits s'était comblé de plus de 50 cm entre les deux essais. Les courbes de débit en fonction du rabattement sont sensiblement linéaires, ce qui tend à prouver que la perméabilité des terrains est homogène sur la hauteur exploitée de la nappe.

Alimentation de la nappe.— Si la nappe de Beomby-Lovo est suspendue par rapport aux nappes inférieures, c'est aussi, topographiquement, une nappe perchée ; sur la carte de la planche XII, l'escarpement formé par les affleurements de l'Eocène à Huîtres a été figuré ; on voit qu'il limite la zone d'alimentation possible vers le Nord-Est et que seules les pluies tombant sur une superficie d'environ 275 km² peuvent parvenir à la nappe, en supposant que son mur imperméable existe dans toute cette zone. La carte de la planche VI, très interpolée dans cette région, montre une pluviosité possible de 450 mm par an ; si l'évapotranspiration est, comme nous le pensons, de l'ordre de 400 mm, il reste encore une faible tranche annuelle susceptible de s'infiltrer et de fournir à la nappe plus de 10 millions de m³ d'eau par an. Les variations saisonnières de qualité de l'eau et de niveau piézométrique ne font que confirmer le fait, topographiquement obligatoire, de l'alimentation directe.

Continuité de la nappe.— Nous avons jusqu'ici postulé la continuité de la nappe de Beomby et de son mur imperméable ; il est juste d'avouer que, jusqu'ici, on ne connaît ce mur marneux que dans le vovo d'Isatrapaly et dans les déblais du puits d'Ankalirano ; partout ailleurs, y compris dans les sources qui correspondent seulement à l'émurgence de la partie supérieure de la nappe (et qui ne coulent d'ailleurs véritablement qu'en saison des pluies), on ne voit que les calcaires marneux contenant la nappe (l'aspect marneux pouvant d'ailleurs être dû simplement à une altération superficielle ; ils sont, en tous cas, fissurés). On pourrait donc dire que les points d'eau de cette région correspondent à de très petites nappes localisées sur

des niveaux différents, sans continuité. Cette hypothèse ne nous paraît pas vraisemblable : il n'y a aucune raison, sauf coïncidences improbables, pour que les niveaux de l'eau dans des nappes différentes se raccordent sans difficulté et sans exception comme le montre la planche XII ; d'autre part chaque nappe ne disposerait que du périmètre d'alimentation situé immédiatement au-dessus d'elle, ce qui semble insuffisant pour créer des débits permanents, compte tenu de l'irrégularité des pluies ; enfin on voit mal pourquoi de telles petites nappes locales ne se formeraient pas également, dans les mêmes conditions pluviométriques, dans d'autres régions du plateau Mahafaly, sur les niveaux marneux qui sont partout abondants dans l'Eocène à Huîtres.

Notre postulat initial étant ainsi validé par l'absurde, à défaut d'arguments positifs qui exigeraient une étude géologique détaillée de toute la région, il reste à expliquer la localisation des points d'eau dans cette zone. Tout d'abord ils sont situés dans des dépressions ou en bordure de dépressions topographiques, où la nappe est plus près de la surface du sol, et où les anciennes circulations superficielles ont pu aussi provoquer une fissuration plus importante. La nappe elle-même se trouve dans la partie supérieure de la série stratigraphique et nous croyons pouvoir identifier son mur avec les niveaux marneux que l'on trouve presque au sommet de l'escarpement Est du plateau : sur la piste Isatrapaly-Beahitse, on voit des marnes blanches au-dessous de calcaires marneux jaunes formant le replat structural du sommet ; sur la piste Beomby-Ejeda, des marnes blanches analogues affleurent immédiatement à l'Ouest de la mare Vondroina (cote 336), sous des calcaires dolomitiques jaunes. Plus au Sud les mêmes niveaux n'affleurent que dans une bande de 2 à 3 kilomètres de largeur Est-Ouest, entre la cuesta orientale et de petits escarpements à regard Ouest, également figurés sur la planche XII. Le très faible impluvium du niveau aquifère dans cette zone explique l'absence de sources à la base de ces petites falaises. On peut remarquer que l'on trouve partout à l'Ouest immédiat, des dépressions à fond plat, analogues aux dépressions d'Andoharano et de Zantondrotsa, évoquant d'anciens lacs ou marais qui pouvaient être alimentés par des sources à une époque plus humide du Quaternaire (Rappelons que la présence assez fréquente de débris d'oeufs d'Aepyornis à la surface du plateau Mahafaly et sur les replats de la cuesta orientale prouve que la topographie actuelle n'est guère différente de ce qu'elle était au Quaternaire ancien).

La forme des contours de l'Eocène à Huîtres suggère un léger encllement synclinal dans cette région : tandis que l'Eocène à Alvéoline affleure largement dans la cuvette d'Ilempo au Nord et suivant une bande continue à l'Est, il est en partie masqué, en même temps que l'Eocène inférieur et le Sénonien supérieur sous le Néogène continental de la région d'Andranoabo au Nord-Est. Si notre hypothèse suivant laquelle le bassin sédimentaire profond est limité à une ligne **Andranoabo-Itampolo** est exacte, il serait normal d'avoir à sa bordure une zone synclinale, dont l'axe Nord-Est-Sud-Ouest passerait par Beomby, et qui favoriserait la concentration des eaux de la nappe

dans cette région. Là encore des levés structuraux détaillés seraient nécessaires.

Extension de la nappe et recherches possibles. - L'extension possible de la nappe de Beomby-Lovo est évidemment fonction de celle de son mur imperméable. Il y a donc lieu tout d'abord de rechercher sa position stratigraphique exacte, de le reconnaître aux affleurements dans les cuestas Nord et Est et d'effectuer des sondages pour en déterminer la structure. Ceci exige d'importants travaux topographiques (nivellement) et géologiques. Nous ne pensons cependant pas qu'en dehors de quelques améliorations locales, il soit possible de développer beaucoup l'exploitation de la nappe dans la région de Beomby et au Nord-Est, du fait de la diminution de l'impluvium dans cette direction. La question la plus importante du point de vue pratique est celle de l'extension de la nappe vers le Sud-Ouest et l'Ouest. Si le niveau imperméable se prolonge dans cette dernière direction, comme nous le pensons, on peut espérer trouver la nappe à des altitudes de l'ordre de celles qui sont indiqués planche XII et quelques sondages sont nécessaires dans cette région. La probabilité de succès est moins grande vers le Sud-Ouest et le Sud, où la partie supérieure de l'Eocène à Huîtres ne semble pas exister ; les eaux de la nappe se perdraient donc en profondeur pour rejoindre des nappes inférieures, éventuellement le réseau karstique général de l'Eocène.

AUTRES POINTS D'EAU. - Il n'est pour le moment pas possible de rattacher les points d'eau isolés de l'Eocène à Huîtres à des nappes déterminées. En bordure de la cuvette d'Ilembo, le vovo d'Andrakiry, qui déborde en saison des pluies pour former une mare, montre 1,5 mètre de terre grise sur une marne plastique jaune et verte ; le débit est très faible mais permanent. Le vovo Somory, dans une mare temporaire, paraît correspondre à une très petite nappe locale.

Au Sud-Est de Beomby, des points d'eau aujourd'hui abandonnés, réputés permanents en 1948, sont situés près de la piste Ejeda-Toboky-Itampolo ; à Anjaha, le débit était de l'ordre de 40 litres/heure. Le fait important est l'existence d'une ligne de petites sources temporaires au flanc de la falaise supérieure du plateau, près du lieu dit Ranokisoke ($X = 182,6$; $Y = 191,3$) ; il s'agit de légers suintements au-dessus de marnes vertes, blanches par altération, à débris d'Huîtres, qui tariraient vers Février-Mars pour reprendre vers Septembre chaque année. Il y aurait donc possibilité d'une nappe perchée, analogue à la nappe de Beomby, dont le trop-plein en saison des pluies alimenterait ces sources à contre pendage.

Le vovo Ranomasy est le seul point d'eau permanent du plateau Mahafaly au Sud-Est de la vallée de la Linta. Situé dans un thalweg, à la tête

de la vallée sèche de Ranomasy, affluent de la Linta ($X = 166$; $Y = 198,5$), c'est un simple trou dans les éboulis calcaires, avec des marno-calcaires au fond ; l'eau est à deux mètres de profondeur (Mai 1956) et, bien que mauvaise (4,38 g/l de chlorures) et polluée, est très utilisée pour l'alimentation humaine et pastorale. Du point de vue géologique, le vovo se place vers la base de l'Eocène à Huîtres (voir coupe 5, planche IIIa) qui affleure sur tout le pourtour du plateau de Ranomasy. La pluviosité moyenne dans cette région doit être de l'ordre de 500 mm par an et il est très probable, comme à Beomby, qu'il existe une nappe continue, alimentée directement, mais connue en ce seul point. Des conditions tectoniques doivent également intervenir, car on remarque au Nord du vovo des pendages (photogéologiques) très nets vers le Sud-Est. La recherche de cette nappe et des points exploitables sur le plateau de Ranomasy pose les mêmes problèmes géologiques (stratigraphiques et structuraux) que dans le cas de la nappe de Beomby-Lovo.

NAPPE D'ANKAZOMANGA

L'étude des nappes suspendues dans les formations continentales du Néogène et du Quaternaire ne peut guère être faite que suivant un ordre régional, faute de pouvoir séparer de façon certaine celles qui sont uniquement dans le Néogène ; dans la plupart des cas les formations superficielles contiennent une partie de la nappe. Nous les décrirons donc successivement du Nord-Ouest au Sud-Est.

POINTS D'EAU.— Alors que les affleurements éocènes à l'Est et à l'Ouest sont absolument secs, une quinzaine de points d'eau sont concentrés dans la cuvette d'Ankazomanga, sans que, d'une façon générale, la topographie ou la nature du sol indiquent des points privilégiés ; à l'exception de quelques mares à fond argileux, la couverture de sables roux argileux est en effet très homogène.

Sauf pour le point d'eau actuellement comblé de Tokoindolo Nord, à l'extrême Nord-Ouest de la cuvette, qui par sa position en tête d'un petit thalweg, évoque une source, tous les points d'eau figurés planche XIII sont des vovos ou puits en plaine, où la profondeur de l'eau ne dépasse pas 4 mètres en saison sèche. Le puits d'Ankazomanga (REYNIER, 1915) comporte un réservoir de 6 mètres cubes dans la nappe, avec deux drains en pierres sèches de 16 mètres de long, le tout permettant l'alimentation du puits par une surface de 22 mètres carrés. La plupart des points d'eau, y compris le puits à buses d'Antsatra-Maroarivo, sont recreusés en saison sèche, pour suivre les variations du niveau de l'eau.

SURFACE PIEZOMETRIQUE. - La carte régulière au 1/100.000 permet de coter approximativement les points d'eau, ce qui conduit à tracer les courbes isopiézo-métriques de la planche XIII ; il est certain que l'extrapolation est importante, en particulier dans la partie Est de la cuvette où il n'existe aucun point d'eau. L'absence d'anomalies et l'homogénéité des mesures de teneur en chlorures et de dureté totale (voir plus loin) laissent supposer qu'il y a une nappe unique, sinon continue (car elle pourrait être localisée dans des zones de perméabilité favorable) qui n'est pas exploitée dans la région Est pour la simple raison qu'elle y est plus profonde.

A partir du Nord-Est de la cuvette ou, plus exactement du glacis d'Ankazomanga, la nappe s'écoule dans le sens de la pente topographique, d'une part vers l'Ouest, avec une pente de l'ordre de 7 à 8 pour mille pour aboutir en tête du thalweg Belila, tributaire de l'Onilahy, d'autre part vers le Sud-Ouest jusqu'aux dépressions de Maroarivo et Andranovaky, qui s'acoulent normalement vers le couloir d'Itombona, avec une pente, plus faible, de 4 à 5 pour mille.

Les variations du niveau piézométrique sont importantes ; les amplitudes indiquées par les habitants sont comprises, suivant les points, entre 1,8 et 4,2 mètres, en moyenne 3 mètres. Pour le puits d'Antsatra, sur quatre mesures, les deux dernières seules correspondent certainement au niveau statique et nous n'avons pas de mesures en saison des pluies :

Février 1949	:	eau à 5,35	sous margelle
31-7 -56	:	- 4,78	-
9-10-57	:	- 4,06	-
28-7 - 58	:	- 4,57	-

QUALITE DE L'EAU. - A notre connaissance, aucune analyse complète n'a été effectuée. Les essais de Juillet 1956 montrent des teneurs en chlorures très faibles, comprises suivant les points entre 0,02 g/l et 0,10 g/l. et des eaux très douces pour la région : 1^o à 12^o hydrotimétriques, sauf dans quelques vovos de grand diamètre où l'eau peut se concentrer par évaporation : 23^o dans un vovo d'Antsatra, 24^o à Ankandy. D'une année à l'autre, en même saison, les teneurs sont également peu variables : 0,06 à 0,10 g/l de NaCl et DHT à 10^o pour le puits d'Antsatra en 1956, 1957, 1958 (saison sèche).

DEBITS. - Au moment du creusement du puits d'Ankazomanga, REYNIER (1915) a effectué des mesures de débit dans des puits d'essais. Pour un rabattement de 0,55 mètre de la nappe, le débit était de 320 litres/heure pour une

EXTENSION DE LA NAPPE.— En ce qui concerne l'extension maximum possible, il est certain que la nappe d'Ankazomanga est strictement limitée aux formations continentales et ne se prolonge pas vers l'Ouest dans les calcaires de l'Eocène à Alvéolines où l'eau doit se perdre rapidement en profondeur, pour rejoindre le réseau karstique général. Mais à l'intérieur même du Néogène, on ne connaît actuellement ni l'extension verticale de la nappe, ni les zones stériles possibles ; la nature du ou des réservoirs de la nappe est inconnue, le mur imperméable n'est visible nulle part. Dans la plupart des cas, seule la partie tout à fait supérieure de la nappe est exploitée et on ignore totalement les raisons qui ont pu faire choisir un point plutôt qu'un autre. Avec si peu de données, il est préférable de s'abstenir de commentaires et de recourir à des recherches pratiques.

RECHERCHES POSSIBLES.— Elles doivent porter en premier lieu sur le problème de l'alimentation de la nappe et sur son extension ; la zone la plus indiquée est d'abord celle qui est située près de la faille probable dans l'Eocène, où l'on peut espérer trouver des sédiments grossiers de piedmont. Dans la mesure seulement où ces problèmes seront résolus, on pourra songer à développer, dans le cas le plus favorable, l'exploitation actuelle, soit en multipliant les points d'eau, soit en approfondissant largement ceux qui existent pour augmenter leur débit (à condition que la puissance de la nappe soit suffisante). En cas de résultats défavorables en ce qui concerne l'alimentation et l'extension, c'est-à-dire si il n'y a aucune alimentation par des nappes profondes ou voisines et si la nappe est limitée à quelques chenaux de perméabilité, on ne pourra songer qu'à des puits du même genre que ceux qui existent, en s'éloignant peu à peu des points d'eau actuels, pour délimiter et utiliser entièrement la zone aquifère.

J. ARCHAMBAULT (1957) a envisagé la possibilité de suralimenter la nappe d'Ankazomanga par la construction de barrages en terre pour limiter les pertes par ruissellement, au profit des calcaires, en particulier en bordure Nord et Nord-Ouest de la zone aquifère. Ce procédé est certainement susceptible de provoquer une amélioration des conditions actuelles, mais encore faudrait-il, par des études détaillées et chiffrées en estimer à l'avance la rentabilité ; à première vue, la largeur des zones de ruissellement, comparée à leur profondeur, exigera des ouvrages très importants. De toutes manières, il semble raisonnable et logique de n'entreprendre ces travaux qu'après avoir épuisé toutes les autres possibilités plus naturelles d'amélioration, probablement moins coûteuses.

COULOIR D'ITOMBONA ET REGION D'ANDRANOABO

COULOIR D'ITOMBONA.- Dans le couloir d'Itombona, tous les sondages effectués en 1944 et 1948 pour l'alimentation en eau sur le tracé de la voie ferrée Sakoa-Mozambique ont été infructueux. Il existe bien quelques pièges lithologiques dans les terrains néogènes, mais ils ne contiennent pas de nappe aquifère, malgré les possibilités d'alimentation directe et par ruissellement dans le couloir ; il est probable que les niveaux imperméables ne sont pas assez continus et que toute l'eau d'infiltration est drainée en profondeur dans les calcaires éocènes. Par sa faible altitude relative, cette région est très favorable à des sondages de recherche de nappes profondes, mais il faut renoncer à tout espoir de trouver des nappes importantes à faible profondeur.

PLATEAU DE VOHITSARA.- En dehors du puits de Vohitsara, qui atteint les calcaires, les recherches sur le plateau de Vohitsara sont restées dans les formations continentales néogènes. Celles d'Andakara, presque au point culminant du plateau, et de Vohitomotsy à l'entrée du couloir d'Itombona n'ont rien donné, bien qu'il existe une couche sableuse de six mètres de puissance au-dessus d'argiles, entre 12 et 18 mètres à Vohitomotsy. Par contre les sondages d'Ambolely (PK.97,5) et Anjeba (PK.100,4) ont trouvé une nappe aquifère, respectivement à 18 et 22 mètres de profondeur dans une série très analogue, à prédominance sablo-argileuse, mais n'ont traversé la nappe que sur un mètre, sans reconnaître son mur. Suivant les altitudes, il pourrait s'agir en effet d'un même niveau aquifère dont la pente vers le Nord-Ouest serait de 5 pour mille. Les deux points sont situés dans un thalweg drainant toutes les eaux de ruissellement du plateau et il serait possible de rechercher le prolongement de cette nappe vers l'aval. Les puits sans soutènement creusés à Ambolely donnaient, d'après H. BESAIRIE, une eau très pure. Le débit n'est pas connu mais suffisait au chantier de la voie ferrée.

Le vovo de Fanomboka-Antanantsoa, près de la route Ejeda-Betioky, où nous avons relevé en Août 1956, plus de 7 mètres d'eau à 3,4 mètres sous le sol n'est probablement qu'un essai de puits rempli temporairement par les eaux de ruissellement, car la hauteur d'eau en Octobre 1957 n'était plus que de quelques centimètres.

REGION D'ANDRANOABO-SAINTA.- Les conditions sont semblables à celles du plateau de Vohitsara dans la région d'Andranoabo-Sainta, située immédiatement au Sud-Est et les recherches dans le Néogène ont donné soit des résultats négatifs, soit de faibles débits, du fait de la discontinuité des niveaux et de la faible perméabilité des terrains.

En dehors des deux vovos, d'ailleurs comblés, de Tsilamaha qui exploitaient de petites accumulations d'eau dans des alluvions grossières de ravins en contre-bas de la falaise limitant le plateau Néogène au Nord, on ne peut guère citer que les puits et vovos de Santa, exploitant une petite nappe entre 2 et 4 mètres sous le sol, dont l'extension est très limitée puisqu'elle n'a pas été retrouvée un kilomètre à l'Est, et le puits de recherche d'Andranoabo (PK. 118,7) maintenant comblé, où l'eau est dans des sables très argileux vers 10 mètres de profondeur.

Dans les deux cas, les débits sont très faibles : à Andranoabo il a été évalué (Anonyme, 1949) à 70 l/h pour un rabattement supérieur à 0,60 mètres. A Santa où il était estimé à 60 l/h en 1948, un essai de pompage en Septembre 1957 a montré un débit de 180 l/h pour un rabattement de 0,75 m. Les eaux sont peu minéralisées : NaCl 0,05 g/l et DHT 4° (analyse Institut Pasteur) à Andranoabo en 1948, 0,14 à 0,21 g/l de chlorure et 11° à 25° hydrotimétriques suivant les puits à Santa en Août 1956. On dispose pour ce puits d'une analyse complète de R. de ROBILLARD, en Juillet 1948, qui montre 18,7 mg/l de NO₃.

A 7 et 12 kilomètres de Santa, le puits Ambatavo et les vovos de Marovotry, tous deux situés dans des vallées tributaires de la Belamoty, remblayées par des alluvions anciennes, sont également creusés dans le Néogène continental, mais il est possible que la nappe repose là sur le socle cristallin (comme aux puits d'Andranoabo que nous étudierons avec la nappe générale). Le puits Ambatavo, vraisemblablement à faible débit, donne une eau peu minéralisée, tandis que les vovos de Marovotry, dans des grès argileux à lits ferrugineux donnent un débit important d'une eau très dure et très chlorurée (3,08 g/l de NaCl, 120° DHT en Mai 1956).

CONCLUSIONS POUR LE NEOGENE DANS CETTE REGION.- De l'énumération qui précède des points d'eau et recherches dans la série d'Andranoabo, il résulte que les chances d'y trouver de l'eau, et surtout des débits importants, sont très limitées. En ce qui concerne l'alimentation possible, si la pluviosité est suffisante, l'impluvium est assez réduit à l'Ouest de la falaise dominant les formations du Karroo ; de plus, les sols sont assez souvent très argileux et propres au ruissellement vers des zones privilégiées. Le principal obstacle à la formation de nappes importantes est l'absence de bons réservoirs, car les niveaux imperméables ne manquent pas. Si, dans les affleurements de la falaise Est, les grès, plus ou moins lessivés, paraissent très perméables, ils se montrent presque partout très argileux dans les sondages. Les travaux doivent consister à rechercher les zones de meilleure perméabilité, et ceci ne peut se faire que par sondages multiples ou prospections électriques. A priori, ces zones doivent coïncider à peu près avec les vallées anciennes telles que celles d'Ambolely, Santa et Ambatavo.

Remarquons que, au moins pour la région d'Andranoabo, d'autres possibilités sont offertes par des nappes inférieures, soit au contact du Karroo (type Ambatomainty), soit dans le socle cristallin altéré (nappe générale).

NAPPES TEMPORAIRES DE LA REGION D'AMPANIHY

NORD-OUEST D'AMPANIHY.- Entre la piste Ampanihy-Ankazontaha et les affleurements du socle cristallin, quelques vovos, aujourd'hui abandonnés pour la plupart, correspondent à de très petites nappes temporaires dans les sables roux superficiels et la partie supérieure du Néogène continental, constituée par des grès argileux à Emalo et Sakoabelomy. Il est probable que ces nappes n'ont pas pour mur un lit argileux déterminé, mais qu'il s'agit simplement d'accumulations dans des zones altérées de surface, le sous-sol inaltéré étant relativement imperméable; les eaux provenant principalement du ruissellement diffus, sont retenues quelque temps, pour se perdre d'une part par évaporation, d'autre part en profondeur.

SUD-OUEST D'AMPANIHY.- Les vovos plus nombreux situés entre 15 et 25 kilomètres au Sud-Ouest d'Ampanihy, au Sud de la route d'Androka, entre Retanjo au Nord-Est et Sihanamitohy-Antsanira au Sud-Ouest appartiennent au même type de nappe superficielle temporaire. Les vovos sont le plus souvent dans des sables roux reposant sur des grès ferrugineux (Retanjo), parfois dans des grès argileux grossiers gris (Emenetsa). Un essai de puits qui aurait atteint 8 mètres à Retanjo-ambony et le sondage d'Antasanira montrent qu'il n'y a pas d'eau en profondeur et qu'il y a bien tarissement des nappes quelques mois après les pluies, et non abaissement du niveau statique.

Il n'y a donc aucun espoir d'améliorer l'alimentation en eau à partir de ces nappes.

NAPPE PHREATIQUE DE BELOHA

Dans la localité de Beloha et à ses environs Ouest et Sud, on compte une cinquantaine de puits qui trouvent l'eau dans des sables blancs superficiels au-dessus d'argiles sableuses (ou grès argileux) gris-verdâtre, pour lesquelles il est difficile de dire s'il s'agit du sommet du Néogène continental ou de formations pluviales quaternaires. Ces puits figurent sur la carte au 1/20.000, planche XIV; certains sont très anciens, comme le puits n°47 (Namandriha) connu en 1910, les puits n°2 (creusé en 1922) et 3; beaucoup d'autres ont été construits depuis 1948, date de la première étude de H. BESAI-

RIE. Par contre, entre cette date et 1958 on constate la disparition de plusieurs puits boisés, en particulier dans la région de Zambe, à l'Ouest de Beloha. Un nivellement précis de tous les puits a été effectué en 1956 et des études détaillées ont été faites en 1956 et 1958. Il résulte de ces études une abondante série de chiffres qu'il serait fastidieux et inutile de donner tous ici et dont nous tenterons seulement d'extraire les faits principaux.

CONTINUITE DE LA NAPPE.— On constate tout d'abord que les puits sont localisés dans de zones bien déterminées : partie Sud-Ouest de Beloha (10 puits productifs en 1958), région de Zambe (une dizaine de puits en 1948, un seul productif en 1958), autour du village Andangara (12 puits en eau), dans une zone allongée Nord-Ouest-Sud-Est entre Masina et Andrado (18 puits) et au Sud immédiat du village Namandriha (un seul puits, en cours de réfection en 1958).

Le relief du sol étant partout pratiquement nul, avec des altitudes comprises entre 154 et 150 mètres, et l'eau étant, aux points exploités, à une profondeur qui n'atteint 5 mètres qu'à l'extrême Sud de la zone de Masina, on peut penser que la nappe a été recherchée un peu partout par les indigènes, sans succès en dehors des régions précédentes. Le mur de la nappe se trouve à 5,5 mètres de profondeur au sondage de Beloha, près du puits n° 6, à 7,5 mètres au sondage de Masina, près du puits n°37 et la puissance de la nappe aux points exploités, est très faible : 2,25 mètres environ au puits n° 6 en Mai 1958, moins de 5 mètres au puits n°37 à la même époque. Il est donc probable que dans les zones actuellement stériles, le niveau argileux est très près de la surface du sol, au-dessus du niveau piézométrique théorique figuré sur la planche XIV et que les eaux s'accumulent seulement dans les points bas (pièges morphologiques). Nous avons une bonne confirmation de cette hypothèse dans le fait que les puits situés à proximité des affleurements du mur de la nappe (puits n° 1, près d'affleurements argileux au Nord immédiat de la route Beloha-Tsihombe) débitaient fort peu en 1956 et étaient taris en 1958.

Si la nappe n'existe pas partout de façon permanente, il y a tout lieu de penser cependant que les zones d'exploitation actuelles communiquent entre elles, à la faveur d'ondulations du mur argileux formant des chenaux de circulation non encore reconnus, car on conçoit mal la possibilité de lignes isopiézométriques continues dans le cas de nappes indépendantes. Les analogies de composition chimique de l'eau dans les diverses zones suggèrent en tout cas une alimentation identique et au moins des possibilités de correspondance dans les périodes de crue de la nappe. Dans tout ce qui suit nous admettrons donc que la nappe est continue et correspond à un même système aquifère, en laissant aux recherches futures le soin de trancher la question.

SURFACE PIEZOMETRIQUE.— Les courbes de la planche XIV représentent les lignes isopiezométriques (théoriques hors des zones exploitées) de la nappe en Mai 1958. A partir d'une région, topographiquement un peu plus élevée, située au Sud de Zambe, la nappe semble s'écouler vers le Sud et le Sud-Est, avec une pente de l'ordre de 2 pour mille dans cette dernière direction. Les lignes que l'on peut tracer d'après les relevés de Mai 1956, ont approximativement la même forme, mais la nappe étant plus basse à cette époque, on constate des anomalies dans les régions où les puits sont très proches les uns des autres, en particulier autour des puits n° 17 et 19 d'une part, 23 et 24 d'autre part, à Andangara : la surexploitation de la nappe crée des dépressions quasi-permanentes de la surface piézométrique.

Pour la zone de Beloha, on a trois séries de mesures du niveau de l'eau dans les puits (Novembre 1955, Mai 1956, Mai 1958) qui aboutissent aux conclusions suivantes : la nappe s'est abaissée au total (il y a eu évidemment des oscillations entre les mesures) de 0,75 à 1,13 mètres dans les puits de l'Est de la ville et les puits n° 1 et 2 se sont totalement asséchés en 1958. Dans les autres puits, le niveau s'est faiblement abaissé (8 à 29 cm) entre Novembre 1955 et Mai 1956, pour s'élever de 60 à 130 cm entre Mai 1956 et Mai 1958. Il y a donc à la fois des variations saisonnières, qui paraissent faibles, et des variations à plus longues périodes et de plus grande amplitude à mettre en relation avec les irrégularités des précipitations.

Pour les autres zones, les mesures de Mai 1956 et Mai 1958 montrent un relèvement de niveau très variable à Andangara (2 à 114 cm) où les dépressions de la surface piézométriques existant en 1956 se sont "comblées", un abaissement de 27 cm dans le seul puits subsistant à Zambe, et à Masina un relèvement très général, presque partout supérieur à un mètre (exactement 69 à 162 cm).

Au total, en faisant abstraction des fluctuations de la nappe dans la période intermédiaire, tout se passe comme si la nappe de Beloha s'était gonflée au Sud pour s'aplatir au Nord et surtout au Nord-Est entre 1956 et 1958. Les causes du phénomène restent obscures.

Il est certain que des erreurs peuvent être dues au fait que le niveau de l'eau mesuré n'est parfois qu'un niveau dynamique après puisage ; mais les conclusions sont statistiquement exactes en raison du grand nombre de puits. Le tableau ci-dessous donne les profondeurs de la nappe (sous margelle) pour trois puits dont les débits ont été mesurés en 1957 et 1958. Pour les deux dernières séries de mesures il s'agit effectivement du niveau piézométrique.

<u>Puits</u>	<u>Mai 1956</u>	<u>Août 1957</u>	<u>Mai 1958</u>
N° 6	4,66	4,33	3,74
N° 27	3,59	3,64	3,50
N° 44	4,84	4,64	4,34

QUALITE DE L'EAU.— Si l'on considère l'ensemble des mesures de teneur en chlorures et dureté totale à une époque déterminée (Mai 1956 par exemple), pour tenter de délimiter des zones d'égale teneur, on est amené à constituer deux groupes très inégaux : d'une part la majorité des puits, où la teneur en chlorures est comprise entre 0,06 g/l et 0,20 g/l et la dureté entre 9° et 30°, d'autre part quatre puits seulement (N° 2, 3, 4, 28) où l'on a, à la même époque, entre 0,33 et 0,43 g/l de NaCl et 43° à 56° DHT. Sur ces quatre puits, trois sont très anciens et le quatrième est pratiquement inutilisé. Il n'est pas douteux que l'augmentation de minéralisation tient à ce défaut d'usage (et n'en est pas la cause), et qu'il y a concentration par évaporation dans les puits. Ceci indique en outre que la circulation de l'eau dans la nappe est extrêmement lente (la faible pente de 2 pour mille est d'ailleurs significative).

L'examen des variations de salinité et dureté entre Mai 1956 et Mai 1958, c'est-à-dire durant une période d'élévation de la surface piézométrique, au moins au Sud, conduit aux tableaux suivants :

Teneur en chlorures, en g/l

	<u>Mai 1956</u>	<u>Mai 1958</u>
Beloha n° 5 à 13	0,04 à 0,16	0,04 à 0,20
Beloha n° 2, 3, 4	0,33 à 0,43	0,40 à 0,72
Andangara n° 28	0,38	0,72
Andangara n° 16 à 27	0,07 à 0,15	0,07 à 0,17
Zambe n° 14, 15	0,10 à 0,13	0,11
Masina n° 29 à 46	0,06 à 0,20	0,06 à 0,20
Namandriha n° 47	0,10	0,16

Dureté totale en degrés

	<u>Mai 1956</u>	<u>Mai 1958</u>
Beloha n° 5 à 13	8 à 30	9 à 40
Beloha n° 2, 3, 4	43 à 56	59 à 68
Andangara n° 28	48	72
Andangara n° 16 à 27	10 à 21	12 à 34
Zambe n° 14, 15	18 à 20	27
Masina n° 29 à 46	9 à 25	17 à 46
Namandriha n° 47	21	41

On constate que les teneurs en chlorures varient très peu en général, avec une augmentation nette cependant pour les quatre puits peu utilisés déjà cités, tandis que les duretés sont partout en très nette augmentation, souvent du simple au double si on considère les puits séparément et non pas les chiffres extrêmes donnés dans le tableau. Dès lors, on est tenté de penser

que l'élévation du niveau piézométrique correspond non pas à une modification positive de l'alimentation de la nappe, mais à un déplacement des eaux de la nappe depuis la zone amont qui tend à se "vider", jusqu'à Masina, où l'augmentation de dureté est précisément la plus importante, les eaux s'étant minéralisées pendant leur trajet.

Les essais antérieurs à 1956 donnent des chiffres comparables, avec une nette différence entre les puits utilisés régulièrement dont les eaux sont peu minéralisées et les points d'eau abandonnés où les chiffres maxima de 1,20 g/l de NaCl et 100° DHT ont été relevés en 1944 dans le puits n°2 (H. BESAIRIE).

En ce qui concerne la potabilité chimique, trois analyses (Laboratoire de Chimie et de Recherche des Fraudes, Tananarive) sur des prélèvements de Mai 1956 dans les puits n° 1, 16 et 36 concluent à la non-potabilité, du fait d'une part de la teneur en chlorures (mais nous avons vu que les normes européennes ne pouvaient pas être respectées ici, et les eaux de Beloha doivent au contraire être considérées comme excellentes, à ce point de vue, pour le Sud de Madagascar), d'autre part de la teneur en matières organiques qui, exprimée en mg. d'oxygène, atteint 21,6 mg/l en milieu acide au puits n° 16. Il est certain que la nappe, très proche de la surface du sol, n'est absolument pas protégée contre les pollutions d'origine animale, malgré un effort d'améliorations dans ce sens (abreuvoirs à l'écart des puits, malheureusement souvent inutilisés).

Nous n'avons aucune analyse chimique complète; le seul chiffre concerne les nitrates, avec une teneur en nitrate de sodium de 638 mg/l signalée par R. de ROBILLARD (1949).

DEBITS. - Les puits de la ville de Beloha, à très faible débit, sont réservés à l'alimentation humaine ; la situation rapportée par H. BESAIRIE en Août 1944 ne s'est pas modifiée "la réserve nocturne est rapidement épuisée et les femmes attendent patiemment de pouvoir remplir leurs Calebasses". Seul le puits n° 9 où le puisage est plus important paraît avoir un débit convenable ; il est probable qu'un pompage assez intensif a provoqué un développement des sables aquifères aux abords du puits.

Les puits d'Andangara et surtout Masina sont réputés avoir de meilleurs débits ; ils servent à la fois à l'alimentation humaine et à l'abreuvement pastoral, et des villages du plateau Karimbolo, au Sud, distants parfois de plus de 25 kilomètres viennent y chercher l'eau. Lorsqu'un puits est épuisé, on exploite un puits voisin et ainsi successivement jusqu'à remontée de l'eau dans le premier puits. Ceci implique que le rayon d'action de chaque puits soit très faible.

Les essais de pompage en 1957 et 1958 montrent effectivement une augmentation du débit au Sud de la nappe. Les chiffres maxima obtenus sont les suivants :

Puits	Date	Débit	Rabatt.	Profondeur du plan d'eau rabattu
N° 6, Beloha	11-8-1957	51 l/h	0,50	4,83
-id-	18-5-1958	90	1,62	5,36
N°27, Andangara	12-8-1957	490	1,26	4,90
-id-	19-5-1958	615	1,33	4,83
N°44, Masina	13-8-1957	1460	0,93	5,57
-id-	21-5-1958	1682	1,15	5,49
-id-	20-5-1958	1000	0,89	5,23

Il faut remarquer que tous les débits ont été calculés par la méthode de PORCHET, sauf le dernier (1000 l/h) qui a été déterminé par stabilisation du plan d'eau. Le débit de la pompe étant très supérieur au débit des puits dans les 4 premiers essais, le cône de rabattement n'a pas le temps de se former entièrement pendant le pompage et la remontée de l'eau est plus rapide que dans les essais par stabilisation, d'où une erreur en excès pour les débits calculés (de l'ordre de 30 % dans le cas du puits n°44). Les comparaisons entre les essais effectués dans les mêmes conditions sont cependant possibles.

Les courbes de débit figurant planche XVII, pratiquement linéaires, indiquent que la formation aquifère a une perméabilité homogène. L'augmentation de débit constatée en 1958 se traduit simplement par une translation des courbes, sans modification de leur pente, correspondant à l'élévation du niveau piézométrique entre 1957 et 1958 ; on verra pour d'autres nappes que le fait est assez général et que, pour un même puits, les courbes des débits en fonction des rabattements conservent à peu de chose près la même forme, quel que soit le niveau initial de la nappe. Il en résulte que la simple observation des variations de ce niveau devrait permettre d'estimer, avec une bonne approximation, le débit d'un puits à toute époque de l'année, la forme de la courbe des débits ayant été déterminée au préalable par un essai de pompage.

ALIMENTATION DE LA NAPPE.— La hauteur moyenne annuelle des pluies à Beloha est de 455 mm, répartis en 56 jours. Le maximum annuel connu est de 816 mm en 1953, le minimum de 221 mm en 1943. Les moyennes mensuelles pour la période 1944-1955 sont les suivantes :

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
121	59	43	23	20	36	9	10	16	13	32	101 mm

Si, en moyenne, l'alimentation directe de la nappe est certainement impossible en Juillet-Octobre, une part des précipitations des autres mois, et une grande partie pour les mois de Décembre et Janvier (pluies cycloniques) peut s'infiltrer dans les sables blancs superficiels, très peu argileux en surface où il y a un remaniement éolien. Même si la nappe n'existe pas partout, les eaux peuvent rejoindre, en suivant la pente du niveau argileux de base, les accumulations d'eau dans les points bas. La nappe permanente serait alimentée à la fois directement et par les nappes temporaires des zones non exploitées. Une partie de l'eau peut aussi provenir du ruissellement superficiel sur le glacis d'Ambaro, au Nord-Ouest de Beloha, où les formations provenant du Néogène sont assez argileuses et dont la pente très régulière est interrompue précisément par les affleurements de sables blancs ; il existe d'ailleurs dans ces sables à proximité du Néogène des vovos temporaires, où la nappe n'existe qu'après de fortes pluies. La lenteur du drainage latéral dans les sables blancs, assez argileux en profondeur, amortit les variations de niveau de la nappe qui, si l'alimentation était uniquement directe, seraient certainement plus importantes.

EXTENSION ET RECHERCHES POSSIBLES. - Du double point de vue scientifique et pratique, il y aurait le plus grand intérêt à rechercher, par petits sondages ou puits, quelle est l'extension réelle de la nappe de Beloha, en dehors des zones actuellement exploitées (d'ailleurs surexploitées, et où des tranchées recouvertes seraient plus rationnelles que des puits). On devrait logiquement pouvoir dresser une carte structurale du mur de la nappe, délimiter les pièges morphologiques et préciser le tracé des chenaux permettant le passage de l'eau de l'un à l'autre. Il serait alors possible d'établir un plan cohérent d'exploitation de la nappe qui donnerait certainement des résultats préférables à l'empirisme actuel.

La question essentielle à résoudre est celle de l'extension de la nappe vers le Sud. C'est en effet dans la zone des puits de Masina que l'eau se concentre finalement et que la perméabilité des terrains aquifères paraît la plus forte (élévation maximum du niveau piézométrique, augmentation du débit unitaire). Les sables blancs, réservoir de la nappe, sont connus en surface jusqu'à Barabay, 9 kilomètres au Sud de Beloha, mais le sondage Isampaiza à 6 kilomètres de Beloha et 4 kilomètres de Masina, n'a pas trouvé le mur argileux et il n'y a pas d'eau en surface. Plusieurs hypothèses sont possibles : ou bien le substratum imperméable de la nappe s'interrompt rapidement au Sud de Masina et les eaux se perdent en profondeur, pour rejoindre la nappe générale , ou bien il se relève vers le Sud pour former une structure en "fond de bateau" de direction Nord-Ouest - Sud-Est permettant le drainage latéral des eaux de la nappe vers le Sud-Est. Cette dernière hypothèse expliquerait assez bien l'accumulation de la nappe en direction du Sud où, s'il y avait perte en profondeur, on devrait au contraire avoir abaissement du niveau en

sécheresse ; elle est soutenue également par la présence de dépression à fond argileux pouvant correspondre au mur de la nappe dans les régions de Barabay-Ambatomasy au Sud de Masina et d'Antanimenavondro-Ankily au Sud-Est et par l'existence de vovos permanents, bien qu'à faible débit, à Boronoko, 5 kilomètres au Sud-Ouest de Masina. Là encore des sondages sont indispensables.

La possibilité, techniquement réalisable, de relever le niveau piézométrique de la nappe par des barrages souterrains, assis sur le mur imperméable, peu profond, n'a pas à être envisagée, tant que les recherches ci-dessus n'auront pas été effectuées. De plus, pour l'alimentation de cette région, au moins en ce qui concerne les besoins pastoraux, il y a intérêt à faire appel en premier lieu à la nappe générale qui a été reconnue aux sondages de Beloha et Masina.

AUTRES NAPPES DANS LES SABLES BLANCS DU BASSIN DE BELOHA

Un certain nombre de nappes, permanentes ou temporaires, dont on sait fort peu de chose en dehors des caractéristiques des points d'eau, se trouvent, comme la nappe de Beloha, dans des sables blancs en bordure Nord du plateau Karimbola. Nous décrirons brièvement les principales de ces nappes, sans préjuger de leur continuité, en suivant un ordre géographique (d'Ouest en Est).

KIRIMOSA. - Au Nord immédiat du village Kirimosa (ou Kerimosa), 21 kilomètres Ouest-Nord-Ouest de Beloha (X = 111,5 ; Y = 241), on trouve 6 puits à buses, dont deux comblés, et des vovos exploitant une nappe à 5 mètres sous le sol, dans des sables blancs qui, d'après la coupe du sondeur, reposeraient au sondage n° 15 b de 1952 sur un "roc rougeâtre" (probablement des grès ferrugineux) épais de 1 mètre et sur des argiles jaunâtres de 3,5 mètres de puissance, le mur de la nappe étant dans le sondage à 5,5 mètres de profondeur. Les puits débitent toute l'année, mais très faiblement en saison sèche. Le débit de 2 litres/heure signalé en 1918 est toutefois largement dépassé. La salinité de l'eau est tout à fait comparable à celle de Beloha-Masina, avec 0,14 g/l NaCl et 21° DHT en 1944 (H.BESAIRIE), 0,18 g/l NaCl et 26° DHT en Février 1956.

Deux kilomètres plus à l'Ouest, à Fatsiholobe (ou Ampatiolobe) il existe des vovos abandonnés, également dans des sables blancs et 4,5 kilomètres au Sud-Est, dans le village Masombaha des vovos, qui auraient été creusés après le cyclone de Janvier 1951, exploitant une eau titrant 60° hydrotimétriques en Novembre 1955, non permanente.

Situés respectivement aux cotes 159 , 161 et 142, ces trois points d'eau se trouvent dans l'axe d'une dépression topographique du Néogène (Andovotsifefy) et peuvent bénéficier des eaux de ruissellement s'infiltrant dans les sables blancs immédiatement au Nord de Fatiholobe, mais la puissance de la nappe paraît extrêmement faible.

REGION NORD-OUEST DE BELOHA.— Entre 15 et 5 kilomètres au Nord-Ouest de Beloha se trouvent plusieurs vovos, dont deux seulement sont réputés permanents. Ce sont ceux de Tirimbihy ($X = 109,4$; $Y = 249,6$) et Sihanaboay ($X = 110,3$; $Y = 253,6$) , d'ailleurs creusés respectivement en 1951 et 1954, c'est-à-dire après des périodes fortement pluvieuses et à très faible débit en Février 1956. Les autres points d'eau sont taris ou comblés. Le puits de Kilimiary, construit en 1931, profond de 5,70 mètres, était sec en 1949 et 1956 ; le sondage proche n°30 de 1953 indique à 6,5 mètres de profondeur des grès ferrugineux et argileux sous les sables blancs.

Comme nous l'avons vu à propos de l'alimentation de la nappe de Beloha, il est probable qu'il n'existe une nappe aquifère dans ces régions qu'après de très fortes pluies provoquant un ruissellement important sur le glaciais néogène au Nord, au moment où les eaux pénètrent dans les sables blancs pour rejoindre les nappes plus méridionales.

REGION OUEST DE BELOHA.— Les vovos de Tsikolaky et Nifanitsy, les premiers taris depuis 1952, les seconds creusés après le cyclone de 1951 et débitant encore en Mai 1956, sont creusés dans les sables blancs, mais on voit à Tsikolaky les grès argileux verdâtres sous-jacents. A Nifanitsy, l'eau est à 3,90 mètres sous le sol dans le puits boisé et titrait, en Mai 1956, 0,08 g/l NaCl et 15° DHT.

ANJANDAVA.— Douze kilomètres à l'Est de Beloha, les vovos d'Anjandava ($X = 103,3$; $Y = 272,2$) méritent une mention spéciale, car, au-dessous de 2 mètres de sables blancs, on voit des grès argileux grossiers, gris, et la nappe se trouve non dans les sables, mais dans les fissures des grès ; ces vovos n'existent que depuis 1951 et sont permanents depuis, avec un débit de quelques litres-heure seulement en saison sèche ; en décembre 1955, l'eau titrait 0,14 g/l NaCl et 20° DHT.

REGION SUD-EST DE BELOHA.— A l'exception du vovo boisé de Boronoky ($X=98,1$; $Y = 263,8$) qui débite très faiblement depuis 1953, les vovos de cette région

sont taris ; à Anjahatovo, il y avait de l'eau à 2,5 mètres sous le sol, titrant 0,50 g/l NaCl et 16° DHT en 1949 (PAVLOVSKY) ; à Montovositra on voit encore des traces de vovos qui exploitaient vers 1910 (d'après DECARY) une nappe vers 4 à 6 mètres sous le sol, tarie en 1914. Le sondage Ambolotsifa a trouvé en Mars 1953, soit après de très fortes pluies dans les quatre mois précédents, une petite nappe débitant 80 l/h , à 1,5 mètres de profondeur, dans des sables argileux sous les sables blancs superficiels.

REGION SUD DE TSIHOMBE..- Des vovos temporaires, à une dizaine de kilomètres au Sud de Tsihombe, ont été signalés par R. PAVLOVSKY (1950) et non visités depuis (Antanimalangy, Namoy, Ambovotaka, Ampilofilo). Le débit ne dépassait pas quelques litres à l'heure en 1949. Les sables blancs sont, dans cette région, peu étendus et peu épais.

AMPENGOKA..- Les petits vovos d'Ampengoka, au fond d'un ravin, 3 kilomètres au Nord du Cap Saint Marie sont tout à fait différents des précédents, puisqu'ils se trouvent dans des sables alluvionnaires reposant sur les calcaires éocènes vers la cote +17 mètres et contenant pendant quatre mois par an environ une petite nappe aquifère alimentée par ruissellement et qui n'a évidemment rien de commun avec la nappe littorale. En 1949, l'eau titrait 0,45 g/l NaCl (il y a concentration par évaporation) et 17° DHT.

CONCLUSIONS POUR LES NAPPES DANS LES SABLES BLANCS..- La plupart des observations faites pour la nappe de Beloha sont vraisemblablement applicables aux nappes dans les sables blancs. Elles ne peuvent être permanentes que lorsque le mur argileux des sables forme une dépression et quand l'alimentation directe est renforcée par un ruissellement au Nord de la zone des sables blancs. Ces conditions ne paraissent guère réalisées que pour les puits de Kerimosa, et cette région mériterait une étude plus détaillée. Partout ailleurs les points d'eau existants ne suffisent pas à guider les recherches. Il ne faudra d'ailleurs s'attendre nulle part à trouver des débits importants.

NAPPES SUSPENDUES D'IMONGY, TSIANOHA, IHODO

Au Sud-Ouest d'Ambondro, mais totalement indépendantes de celles du plateau d'Ambondro, quelques nappes, d'ailleurs peu utilisables, sont connues au Nord immédiat de la dune récente Quaternaire.

NAPPE D'IMONGY. - A l'altitude 90 environ, la dépression d'Imongy ($X = 92,3$; $Y = 327,4$), ouverte vers le Nord-Ouest, se trouve entre deux avancées de la dune récente ; en 1939, H.BESAIRIE signalait un puits ayant 10 à 20 cm d'eau à 15,70 mètres sous le sol. Ce puits a été approfondi à 16,75 mètres sans amélioration (10 cm d'eau en Juillet 1944). Le cyclone de Janvier 1951 a rempli la cuvette, où un lac a subsisté pendant un an et le sondage n° 32 de 1953 a trouvé une nappe aquifère à 5 mètres de profondeur dans des sables jaunâtres reposant à 28,3 mètres sur des grès fins à ciment calcaire qui représentent probablement le sommet des dunes anciennes. Dans le puits sans soutènement creusé à l'emplacement du sondage qui avait montré un débit de 300 l/h, l'eau était à 8 mètres sous le sol en Avril 1956 (0,15 g/l NaCl ; 31° DHT) ; ce puits était éboulé en Septembre 1957.

Au fond de la cuvette, à l'emplacement du lac totalement asséché, des vovos de grand diamètre, réputés permanents, donnaient en 1956 à 1 ou 2 mètres sous le sol, une eau titrant 0,06 g/l NaCl et 26° DHT. Un puits, d'ailleurs inutilisé, avec airé de récupération des eaux de pluie avait les caractéristiques suivantes :

Date	Profondeur de l'eau	Hauteur d'eau	NaCl	DHT
Avril 1956	2,50 m	environ 10 m	0,15 g/l	28°
Sept. 1957	3,71	10,15 m	0,14 -	26°
Juin 1958	5,82	7,74 m	0,52 -	58°

Les essais de pompage effectués en 1957 et 1958 montrent que la forte hauteur d'eau correspond bien à la nappe, et non à la récupération des pluies, mais le débit a fortement diminué entre les deux essais : 3800 l/h pour un rabattement de 5 mètres en 1957, 1710 l/h seulement pour un rabattement de 7,22 mètres en 1958. Pour un rabattement à même profondeur (8,50 m) l'écart est encore plus grand : 3.300 l/h en 1957, 600 l/h en 1958.

De tous ces faits, on peut conclure que la nappe est alimentée ici à peu près uniquement par les cyclones et les inondations qu'ils provoquent. De plus l'imperméabilité de son mur (grès) paraît douteuse et, en l'absence de pluies importantes, la nappe tarit progressivement.

NAPPE DE TSIANOHA. - L'historique des nappes superficielles à Tsianoha ($X=89,8$; $Y = 320,3$; $Z = 84$) est encore plus étrange : un premier puits a été foncé entre 1918 et 1922 et arrêté sur une carapace calcaire. Un autre a été descendu plus bas et était éboulé en 1939 ; des vovos à proximité étaient secs à cette époque. En 1943, un puits (TOXAY) donnait une hauteur d'eau de 0,60 m à 25 mètres de profondeur. En Mai 1953, le sondage n° 31 montrait une nappe à

28 mètres de profondeur, dans des sables argileux, avec un débit horaire de 400 litres d'une eau titrant 0,21 g/l de chlorures, mais le puits foncé à cet emplacement en Décembre 1955 est resté sec à 38 mètres de profondeur. Enfin, en Octobre 1957, l'avant trou du deuxième sondage Tsianoha, à quelques mètres du premier trouve des sables blancs fins, légèrement argileux, aquifères à 2,50 mètres de profondeur et l'essai de pompage montre un débit de 100 l/h pour un rabattement de 1,5 mètres, d'une eau titrant 0,60 g/l de NaCl et 23° hydrotimétriques.

Il est évidemment impossible de tirer une conclusion. Tout ce qu'on peut dire c'est que ces nappes, à des niveaux très variables, sont très fugitives et inutilisables.

NAPPE DE IHODO. - A 21 kilomètres au Sud-Ouest d'Ambondro, la dépression totalement fermée de Ihodo ($X = 86,3$; $Y = 322$), à 20 mètres d'altitude environ, est limitée au Sud par la dune récente et séparée du bassin du Manambovo, tout proche, par un seuil à 25 mètres environ. Le fond de la dépression est occupé par deux lacs permanents, mais très salés : lac Ihodo à l'Ouest, parfois envahi par les crues du Manambovo, lac Sihanapoty à l'Est. En Juillet 1939, H. BESAIRIE a relevé une teneur de 180 g/l de NaCl et ces lacs sont exploités actuellement pour le sel.

Ces lacs, qui n'ont évidemment aucune relation avec les eaux marines, sont l'émergence naturelle d'une nappe aquifère, elle-même salée, dont les eaux se concentrent simplement par évaporation sur eau libre. Cette nappe a été identifiée 4 kilomètres au Nord, dans les sondages de Tsianoha, mais au-dessous des nappes superficielles déjà citées ; elle se trouve à 41,3 mètres de profondeur (soit à l'altitude 43 mètres environ) dans des sables grossiers peu roulés mêlés d'argile rouge reposant à 47 mètres sur des marnes grises sableuses. Les mesures de salinité varient de 10 à 12,65 g/l de chlorures et 150° à 182° hydrotimétriques.

L'origine de cette salure importante de la nappe reste mystérieuse. Remarquons que dans la région plus au Nord-Ouest, jusqu'à Tsihombe, les eaux de la nappe du socle cristallin sont également très minéralisées, avec 4 g/l de chlorures dans les puits de Tsihombe, 10 à 17 g/l dans les puits d'exploitation de mica de Sakamasy. Il faudrait peut-être rechercher une origine commune de la salure dans ces deux régions, dans la zone intermédiaire où affleure du Néogène (bassin du Tsivorokely).

NAPPES DU PLATEAU D'AMBONDRO

Il n'est pas utile de s'étendre longuement sur les nappes du plateau d'Ambondro, d'abord parce que nos connaissances sont limitées aux caractéristiques des points d'eau, qui sont très nombreux dans cette région (planche XV) et dont l'énumération n'a pas sa place ici (voir AUROUZE, 1957-a, Zone I), ensuite parce qu'une étude par sondages vient d'être entreprise (Mai 1959) qui, si elle est bien conduite, doit résoudre les problèmes auxquels nous ferons allusion, avant même la publication de ce mémoire.

POINTS D'EAU.— Sur une superficie d'environ 200 kilomètres carrés, on compte une cinquantaine de points d'eau, comportant chacun, en général, plusieurs vovos et des puits, ceux-ci le plus souvent inutilisés. Ces points d'eau sont situés pour la plupart sur le plateau d'Ambondro, approximativement limité par la courbe de niveau 200 mètres autour et au Nord-Ouest du village d'Ambondro et sur le flanc Sud-Ouest de ce plateau, jusqu'à la cote 125 environ.

Dans tous les cas, la nappe aquifère se trouve dans des sables blancs, assez semblables à ceux de la région de Beloha, recouvrant la majeure partie du plateau, dominés, au moins topographiquement, par des sables roux d'origine certainement dunaire, et parsemés de cuvettes fermées dont le fond est occupé par des formations argileuses, formant mares en saison des pluies. Sur le flanc Sud-Ouest du plateau s'amorcent des thalwegs, eux-mêmes tributaires de dépressions fermées en bordure Nord de la dune récente.

Du point de vue topographique, les points d'eau sont fréquemment situés sur les pentes autour des cuvettes fermées ; c'est le cas par exemple pour les puits et vovos d'Ambondro, au Sud du village, qui entourent presque entièrement la dépression, pour les vovos d'Ibelo, Fomehy et Ianafandrambita autour de la cuvette de Misikina, dont le fond est à une cote inférieure de 15 mètres à celle des vovos les plus bas, à 400 mètres de distance. Plus rarement, dans les dépressions moins accusées, on trouve les vovos au fond ou presque au fond des cuvettes (anciens vovos d'Iraho, puits de Mangily, Belem-boka, Sanadiva). Dans de rares cas (Ankazomanga, Antaikomby, Itondroky) les points d'eau sont au sommet même du plateau.

Sur le flanc Sud-Ouest du plateau, les vovos sont le plus souvent situés dans les thalwegs, où les sables blancs sont remaniés par ruissellement, et ils prennent alors l'apparence de vovos en sous-écoulement. En fait, il semble que les nappes soient très localisées et que la position dans les vallées soit due seulement à la moindre profondeur de l'eau.

PERMANENCE DES POINTS D'EAU..- Autant que l'on puisse accorder crédit au dire des habitants de la région, il semble que les points d'eau véritablement pérennes, bien qu'à débit très variable, se trouvent uniquement dans la région à l'Ouest d'Ambondro (voir planche XV), à l'exception des vovos d'Antaikomby et Ampamoteha. Tous les autres points d'eau sont susceptibles de tarir en saison sèche. Paradoxalement, le niveau hydrostatique est plus élevé dans la zone où la nappe est permanente.

QUALITE DE L'EAU..- En tenant compte seulement des essais effectués en Avril 1956, à une époque où la plupart des vovos étaient productifs (J. RANDRIANARIVONY), on constate qu'à l'exception de quelques points où il y a une concentration anormale due soit à l'inutilisation des puits, soit à un diamètre important favorisant l'évaporation, tous les chiffres sont compris entre 0,04 g/l et 0,35 g/l pour la teneur en chlorures, entre 5° et 26° pour la dureté totale, les teneurs les plus fréquentes étant 0,20 g/l de NaCl et 16° hydrotimétriques.

Du point de vue de la potabilité minérale, ces teneurs doivent être considérées comme bonnes dans le Sud de Madagascar. Il n'est pas de même en ce qui concerne la potabilité organique, car l'eau est toujours à très faible profondeur et non abritée des pollutions. Les mêmes vovos où vont s'abreuver directement les troupeaux servent aussi à l'alimentation humaine. R. de ROBILLARD (1949) signale à Ambondro une teneur de 298 mg/l de nitrate de sodium, sans que l'on puisse déterminer quelle est la part qui provient des matières organiques.

DEBITS..- Tous les points d'eau ont un débit extrêmement variable, essentiellement fonction des précipitations. Les chiffres précis sont rares ; dans un puits recreusé en 1958 à Sihanamaro, on a noté de très faibles infiltrations, de l'ordre de 30 litres par jour, dans des sables très argileux ; il s'agit là d'un débit exceptionnellement faible, mais qui justifie la préférence des populations pour les vovos multiples, de grand diamètre, exploitant une plus grande surface de la nappe (des tranchées seraient préférables car plus faciles à protéger des pollutions).

Dans le puits d'Amborokahaka, 15 kilomètres au Nord-Ouest d'Ambondro, un essai de pompage le 6 Septembre 1957 a montré un débit de 714 l/h pour un rabattement de 1,83 mètres, mais en Juin 1958, il n'y avait que quelques centimètres d'eau dans le puits et aucun essai n'était possible.

Dans un des 5 puits d'Ambondro (puits c du répertoire des points d'eau) un premier essai a donné le débit, énorme pour la région, de 6490 l/h pour un rabattement de 2,47 mètres en Août 1957, mais en Avril

1958, le niveau de l'eau s'étant abaissé de 124 centimètres, le même puits a donné le débit maximum de 2567 l/h pour un rabattement de 1,50 mètres (voir courbes de débit, planche XVII) et un essai par stabilisation n'a montré que 1400 l/h pour un rabattement de 1,33 mètres.

NAPPE OU NAPPES. - A l'exception des puits de la région de Fekony, 10 kilomètres au Sud-Ouest d'Ambondro, où l'eau est, suivant les points, à 6 ou 8 mètres sous le sol, tous les points d'eau du plateau d'Ambondro trouvent l'eau entre 1 et 5 mètres de profondeur (en général 2 à 3 mètres). Il en résulte que, si l'on essaye de tracer des lignes isopiézométriques, celles-ci épousent très fidèlement les courbes de niveau du sol. Mais celui-ci n'étant pas parfaitement tabulaire (dépressions sur le plateau, vallées sur son flanc Sud-Ouest) il apparaît d'importantes anomalies, incompatibles avec l'hypothèse d'une même nappe continue pour tous les points d'eau. On doit admettre ici l'existence de nappes multiples, délimitées, pouvant comporter chacune plusieurs points d'eau et s'étendre d'ailleurs dans des zones actuellement inexploitées. Ces nappes ont cependant deux caractères communs : le mode d'alimentation, étudié plus loin, et le mode de gisement, encore non reconnu et que les recherches en cours devront préciser.

GISEMENT DES NAPPES. - A ce sujet, plusieurs hypothèses sont en présence. Suivant H. BESAIRIE qui a dressé en 1939 une carte détaillée des puits de la région d'Ambondro, la couche argileuse formant le mur de la nappe correspondrait au fond colmaté d'un ancien lac recouvert par des sables éoliens ; l'absence de coloration des sables contenant la nappe serait due à la nappe elle-même, s'opposant à la remontée des hydrates de fer qui colorent en roux les sables des zones non aquifères ; sables blancs et sables roux seraient deux facies d'une même formation. La coupe donnée dans le cas d'une cuvette topographique montre une couche argileuse d'extension limitée sous la cuvette et à peu près parallèle à la surface du sol.

Dans cette hypothèse, et dans le cas typique de la cuvette de Misikina où tous les vovos sont localisés sur les pentes, pour expliquer l'absence d'émergence de la nappe au fond de la dépression et l'absence de tout suintement d'eau sur les pentes au-dessous des vovos, il faudrait supposer pour la surface piézométrique une pente supérieure à 30 pour mille, ce qui, même en tenant compte de la faible perméabilité des sables argileux aquifères, n'est guère admissible.

Pour rendre compte de ce fait, J. ARCHAMBAULT (1956) a proposé l'hypothèse suivante : les cuvettes seraient dues à l'enfoncement dans le sol d'un cylindre de terrains, résultant lui-même de la dissolution de couches profondes ; la rupture, par effondrement, de la couche imperméable supportant la

nappe entraîne, immédiatement à l'aval de la ceinture de vovos, la percolation en profondeur des eaux de la nappe superficielle. La nappe existe sous les plateaux de sables roux, non effondrés, mais non au fond des cuvettes, qui seraient en fait des dolines.

A l'encontre de cette hypothèse, il faut remarquer qu'on ne connaît pas jusqu'ici en profondeur des formations calcaires assez importantes pour pouvoir être responsables de ces effondrements. Le sondage d'Erada, près de la cuvette de Namosira, n'a traversé, au-dessus du socle cristallin à 115 mètres que de très minces lits calcaires vers 100 mètres de profondeur. De plus nous avons vu que dans certains cas la nappe existait aussi au fond des cuvettes.

Les recherches en cours doivent résoudre la question⁽¹⁾ et tout d'abord reconnaître la position relative des sables roux qui affleurent au sommet des plateaux et des sables blancs des zones déprimées et du pourtour des cuvettes. Nous pensons qu'il s'agit de deux formations bien distinctes et superposées, les sables blancs, comme ceux de Beloha, provenant du lessivage et du remaniement par ruissellement de sables dunaires anciens, les sables roux, au-dessus, correspondant à un autre système dunaire plus récent. Les sables blancs formeraient une couche plus ou moins continue au-dessus d'un niveau argileux ondulé provenant d'un épandage par ruissellement au Quaternaire ancien sur des dunes arasées. A notre avis, les cuvettes du plateau d'Ambondro sont, à l'origine, des dépressions interdunaires dans les sables roux supérieurs ; l'alignement des cuvettes suivant la direction Ouest Nord Ouest-Est Sud Est, celles des vents dominants du Quaternaire, est assez visible sur la carte à grande échelle de H.BESAI-RIE, de part et d'autre de la crête de même direction, jalonnée par des points géodésiques. Au cours d'un second épisode pluvial (et l'alternance des argiles et des sables dunaires dans la partie supérieure du sondage d'Ambovombe (planche V) montre bien qu'il y en a eu plusieurs), des lacs ont pu se former entre les dunes, remanier la morphologie des cuvettes, déposer au fond une seconde couche argileuse, qui est celle que l'on voit actuellement et sur laquelle se forment encore des mares temporaires.

Dès lors, il n'est pas absurde d'imaginer que la nappe aquifère dans les sables blancs puisse se trouver entre deux niveaux argileux au-dessous des cuvettes, sans pouvoir affleurer au fond. Dans certains cas, les deux niveaux argileux pourraient être directement superposés, sans

(1)- Le fait que, depuis que le problème est posé, bien que sa résolution ne nécessite que des travaux peu profonds, il ait fallu attendre 20 ans pour pouvoir les entreprendre illustre bien la faiblesse des moyens d'étude, qui oblige à ne considérer comme indispensables les recherches théoriques que lorsque le problème pratique de l'alimentation en eau doit être résolu d'urgence.

intercalation de sables blancs, donc sans nappe. Au sondage Erada, on trouve 1,5 mètre de marne grise sur 1,5 mètre d'argile ocre et 3 mètres de sables argileux à lits d'argile rouge ; les marnes pourraient être récentes, tandis que les argiles formeraient, ailleurs, le substratum des sables blancs, éventuellement d'une nappe si les conditions structurales sont favorables et si l'alimentation est suffisante.

ALIMENTATION DES NAPPES.— La position topographique des nappes au sommet du plateau d'Ambondro ne permet pas d'envisager d'autre mode possible qu'une alimentation directe et par ruissellement très localisé sur de faibles surfaces pour chaque nappe. Dans le cas des points d'eau sur le versant Sud-Ouest du plateau, on peut supposer en plus un drainage latéral à partir des nappes supérieures, à condition que les ondulations du mur argileux permettent le passage de l'eau d'une nappe à l'autre. La pluviométrie dans cette région est comparable à celle d'Ambovombe, avec en moyenne 550 mm de pluie par an.

PERSPECTIVE D'AMELIORATIONS PRATIQUES.— Pour des raisons de trop grande profondeur probable de la nappe générale sous le plateau d'Ambondro, il n'est pas possible, dans l'état actuel de nos connaissances, d'envisager d'autres nappes pour l'alimentation en eau de cette région, où la densité humaine est importante et l'élevage très développé.

Il faudrait donc tenter de trouver un remède, d'une part au faible débit ponctuel des sables blancs aquifères, d'autre part au tarissement saisonnier de la plupart des vovos. Les solutions dépendent évidemment de l'extension des nappes, en surface et en puissance, de la forme de leur mur argileux, de la présence ou non sous les zones de sables roux de sables aquifères ; c'est seulement lorsque ces données indispensables seront connues que l'on pourra établir un programme cohérent d'exploitation, soit en multipliant les puits dans les zones actuellement peu utilisées, soit en approfondissant les points d'eau actuels, si la puissance des nappes le permet, soit encore en utilisant un système d'exploitation par tranchées ou galeries drainantes. D'après les observations faites à Betaranta, dans des terrains analogues, (A. REGOT, inédit) il ne semble pas que l'on puisse obtenir un meilleur rendement des puits en employant la technique du développement, car les sables sont légèrement consolidés, mais le fait n'est peut-être pas général.

En ce qui concerne le tarissement des nappes en sécheresse, il est évident qu'on ne peut rien pour augmenter l'alimentation déficitaire de certaines nappes et la seule solution consiste à trouver des points d'accumulation privilégiés dans les creux des niveaux argileux, où la nappe a des chances de subsister plus longtemps.

AUTRES NAPPES SUSPENDUES
DU BASSIN D'AMBOVOMBE

En dehors de l'importante nappe aquifère d'Ambovombe, étudiée plus loin, on ne peut citer dans les formations néogènes et quaternaires du bassin d'Ambovombe, qu'un très petit nombre d'autres points d'eau, tous temporaires, correspondant à des nappes perchées de faible extension.

Antsivanala.- A une vingtaine de kilomètres au Nord-Ouest d'Ambondro, dans les régions de Laparoy et Ambaro, il existe des placages assez épais (7,5 mètres dans le sondage de Laparoy) de sables blancs très semblables à ceux du plateau d'Ambondro et des cuvettes fermées à mares temporaires. Quelques vovos exploitent une ou plusieurs petites nappes suspendues dans ces sables, sans que l'on connaisse le substratum imperméable (la nappe n'existe pas au sondage Laparoy). A Andamoka et Antsivanala, l'eau était déclarée permanente en 1939 et se trouvait respectivement à 1,75 mètre et 2 mètres sous le sol ; en Novembre 1955 elle était à 6 mètres à Antsivanala, à 3 mètres en Avril 1956, avec des possibilités d'assèchement certaines années. L'eau, très douce (0,02 g/l NaCl et 6° DHT à Andamoka, 0,10 g/l et 9° DHT à Antsivanala en Avril 1956), indique une alimentation directe par les pluies, qui sont de l'ordre de 550 mm par an. Cette région comporte également de nombreuses mares de grandes dimensions, à assèchement tardif.

Sur une moindre surface, les mêmes problèmes que pour les nappes du plateau d'Ambondro sont à résoudre dans cette région.

Voanembo-Etafoa.- Dans une zone allongée Nord Ouest-Sud Est, sur le flanc Nord-Est du plateau d'Ambondro, très riche également en mares temporaires et recouverte par une mince pellicule de sables blancs, il peut exister, immédiatement après les pluies, quelques petites nappes éphémères, exploitées jadis à Voanembo et Etafoa, qui paraissent actuellement totalement taries. Après assèchement des mares, des vovos sont creusés dans leur fond argileux, mais il ne s'agit là que d'une mise en réserve de l'eau.

Andray.- A 17 kilomètres au Nord-Est d'Ambondro, une petite zone de sables blancs paraissant alluviaux a été autrefois exploitée par des vovos et deux puits. L'approfondissement de l'un d'eux a montré jusqu'à 10 mètres des sables gris argileux consolidés reposant sur une couche de 1 mètre de marnes grises très compactes puis, de 11 à 16,1 mètres (fond de la fouille) des sables argileux roux compacts, le tout sans aucune trace d'eau en Janvier 1958.

Sakave..- Immédiatement au Sud-Est du massif de l'Angavo, le ruisseau Tsitempeko (ou Iampasy) présente un sous-écoulement quasi permanent alimenté par les pluies sur un bassin versant assez étendu dans des roches peu perméables (rhyolites). L'eau s'accumule en saison sèche dans les poches sableuses du lit et titrait en Mai 1956 0,14 g/l de NaCl et 18° DHT. Un puits creusé en 1958 à 3 mètres de la berge du ruisseau a montré que l'eau se concentre uniquement dans les alluvions et que la nappe ne s'étend pas dans les grès du bed-rock (Néogène) formant au contraire couche imperméable.

Un très petit point d'eau du même genre se trouve à Ambovo, 8 kilomètres au Sud-Ouest d'Ifotaka, dans les sables d'un thalweg. Le débit, qui serait permanent, est extrêmement faible.

Ampamolora..- Au Sud immédiat du village Ampamolora, presque au centre de la cuvette du même nom, sur une butte de sables dunaires, un puits ancien donne, à 17 mètres sous le sol, une eau très concentrée (13,4 g/l NaCl, 280° DHT) non utilisable ; 150 mètres au Nord, un autre puits exploitait autrefois une petite nappe reposant sur des marnes verdâtres à 6 mètres de profondeur, actuellement tarie. Au Nord-Ouest du village, dans la zone inondable par les cyclones, on remarque une série de thalwegs anastomosés, dans lesquels sont creusés des vovos donnant en saison des pluies un très faible débit provenant de sables gris très argileux. Un puits de 21,5 mètres de profondeur dans un de ces thalwegs, avec des calcaires au fond donnait en Décembre 1957 quelque 30 litres d'eau par jour.

En dehors du puits tari du village qui correspondait sans doute à une très faible accumulation d'eau dans les sables au-dessus des formations marneuses quaternaires du fond de la cuvette d'Ampamolora, les autres points d'eau recueillent simplement l'excès d'eau contenu dans les parties les plus sableuses des mêmes formations, sans que l'on puisse véritablement parler de nappe aquifère.

NAPPE D'AMBOVOMBE

La nappe phréatique d'Ambovombe, connue actuellement sous la ville et dans les environs immédiats, sur une superficie d'environ 2,5 kilomètres carrés, se trouve dans des formations sableuses d'origine dunaire fermant au Sud la cuvette d'Ampamolora-Ambovombe. D'une très grande importance pratique pour l'alimentation en eau d'une vaste région, elle est exploitée par plus de 100 puits, d'ailleurs irrégulièrement répartis (voir planche XVI) qui, en saison sèche, sont les seuls points d'eau entre la côte au Sud, le Mandrare à l'Est, les puits d'Ambaliandro et Ambondro à l'Ouest.

En 1939, H. BESAIRIE a levé une première carte des puits montrant l'allure de la nappe par rapport à la surface du sol ; la constitution géologique et les débits ont été étudiés par tranchée et sondage (1939, 1944), puis, en 1954, par cinq sondages effectués par la S.A.F.E.G.E. (voir BESAIRIE, 1955-b, p.12-18). En 1956 et 1958, nous avons levé une nouvelle carte détaillée, noté les caractéristiques de tous les puits, essayé toutes les eaux en ce qui concerne la teneur en chlorures et la dureté totale. Des essais de pompage (AUROUZE 1958-a et 1958-o) ont déterminé le débit de huit puits.

GEOLOGIE.- La ville d'Ambovombe est bâtie sur une butte sableuse, culminant à 139 mètres d'altitude, entourée de dépressions, pour la plupart fermées, dont le fond est entre 119 et 126 mètres d'altitude. En surface on ne voit guère que des sables roux clairs, à grain fin, avec quelques débris de carapaces calcaires (route de Fort-Dauphin, 1500 mètres à l'Est du marché) et des sols plus argileux grisâtres dans certaines dépressions. Au Nord-Ouest et au Nord de la ville, avec un contour capricieux, mais très net, commence la plaine de Lafidava, presque parfaitement horizontale, à l'altitude de 120 mètres, entièrement formée par des argiles peu sableuses grises qui se prolongent sans aucun doute sous les sables d'Ambovombe.

A 650 mètres au Nord-Ouest du marché, près de l'ancienne route d'Antanimora (environs du puits n°23), la coupe suivante a été déterminée par H. BESAIRIE :

Puissance		Cote approximative (toit)
4,00	Sables roux superficiels	124
1,14	Sables aquifères	120
3,80	Argile plastique	118,86
2,76	Argile légèrement sableuse	115,06
1,30	Sables blancs	112,30

En ce qui concerne la nature exacte des terrains traversés par les sondages de 1954, une incertitude subsiste, car les coupes dressées d'après les échantillons envoyés ne correspondent pas avec les coupes données par le foreur. Les logs reconstitués par H. BESAIRIE sont les suivants :

Sondage n° 1, au Sud de la ville, près du puits n° 101 (ancienne éolienne)

Puissance		Cote (toit)
9,30	Sables roux	128,7
1,70	Sables roux argileux fins	119,4
4,30	Sables roux argileux	117,7

3,20	Sables blancs parfois légèrement consolidés avec lits calcaires (l'échantillon contient des grès bruns friables à ciment calcaire).	113,4
1,30	Sables blancs avec lits de croûtes calcaires	110,2
6,10	Sables blancs plus ou moins consolidés avec grès calcaires et lits de croûtes calcaires (échantillon : grès blancs à ciment calcaire).	108,9
0,30	Argile verdâtre, non traversée.	102,8

Le sondeur a noté une faible infiltration d'eau entre 113,4 et 110,2. Le niveau statique de l'eau était à 20,15 mètres de profondeur, à la cote 108,35.

Sondage n°2, au Nord de la ville, entre les puits n° 26 et 107

5,00	Sables roux (clairs)	124,0
2,00	Sables roux plus ou moins argileux	119,0
2,60	Argile verdâtre, non traversée	117,0

Le niveau statique était à 4,76 mètres de profondeur, à la cote 119,24.

Sondage n°3, au Nord-Ouest de la ville, près du puits n°76.

6,95	Sables roux	132,0
7,30	Sables avec rognons gréseux (échantillon : grès friables à ciment calcaire).	125,05
0,75	Sables gris très légèrement argileux	117,75
1,30	Argile verdâtre, non traversée	117,0

Le niveau statique était à 13,05 mètres de profondeur, à la cote 118,95.

Sondage n°4, à l'Ouest de la ville, près du puits n° 104 (la position exacte n'a pu être reconnue en 1956).

7,10	Sables roux ; quelques concrétions gréseuses	
8,20	Sables gris légèrement argileux	
1,80	Sables roux légèrement argileux	
2,70	Sables gris très fins	
1,20	Argile verdâtre, non traversée.	

La cote du toit des argiles doit être vers 103 mètres. On n'a noté que de très faibles infiltrations d'eau sur 0,80 mètre au-dessus des argiles, à partir de 19 mètres de profondeur.

Sondage n°5, au Sud-Est de la ville, à 800 mètres du marché (cette position est certainement inexacte. Le point précis n'a pu être retrouvé en 1956).

8,10	Sables roux	
1,60	Limons roux	

Le sondage aurait été arrêté à 9,70 mètres dans des argiles, dont le toit serait alors vers la cote 118-120 mètres. Le niveau statique était à 5,75 mètres de profondeur ; nous verrons qu'il y a là une anomalie inexplicable, dont nous n'avons pas tenu compte sur notre carte.

En résumé, au-dessus d'argiles verdâtres qui se trouvent au Nord de la ville à une altitude de 117-119 mètres très comparable à celle de la plaine argileuse de Lafidava, vers 103 mètres à l'Ouest et au Sud, la série comprend des sables plus ou moins consolidés, avec des lits gréseux et des carapaces calcaires fossiles, n'existant pas partout, puis des sables roux superficiels qui atteignent 11 mètres de puissance au Sud. La limite Nord de la grande dune récente du Mahandrovato passe environ 1500 mètres au Sud de la ville, et l'altitude augmente rapidement dans cette direction.

Au-dessous des argiles, la coupe BESAIRIE montre des sables blancs. Par analogie avec le forage Ferme Ambovombe (planche V), 3 kilomètres au Nord-Est du marché, on peut penser qu'il existe plusieurs couches lacustres avec des intercalations sableuses, au-dessus de la grande série duinaire ancienne.

GISEMENT ET FORME DE LA NAPPE.— Le réservoir de la nappe aquifère est constitué tantôt par les sables roux, toujours assez fins, avec une teneur en argile très variable, tantôt par des sables blancs, également fins, plus ou moins consolidés (pouvant passer localement à des grès), avec lits de croûtes calcaires. La perméabilité est en général médiocre.

Le mur de la nappe est formé par les argiles, rencontrées dans tous les sondages (sauf peut-être au sondage n° 5), dont l'épaisseur n'a été reconnue qu'au puits BESAIRIE : 3,80 mètres d'argile plastique, 6,56 mètres avec les argiles sableuses au-dessous ; on peut de façon certaine identifier ces argiles avec celles du fond de la cuvette d'Ampamolora (plaine de Lafidava), mais nous ignorons quelle est leur extension, en dehors de la zone des puits, à l'Est, à l'Ouest, et surtout au Sud. Dans tous les puits, le mur de la nappe doit être vers 115-119 mètres d'altitude, sauf aux puits n° 101 et 104 et dans les sondages proches où il est vers 103 mètres.

La profondeur de la nappe sous le sol dépend évidemment de la topographie et de la forme de la surface piézométrique. En Avril 1958, que l'on peut considérer comme une période d'étiage de la nappe, la profondeur maximum connue était de 19,50 mètres sous le sol au puits n° 101, au Sud de la ville. Cette profondeur conditionne naturellement les facilités d'exploitation et, à ce point de vue, on peut distinguer plusieurs groupes de puits : dans le centre de la ville, puits publics ou particuliers touchant l'eau à

plus de 15 mètres ; au Nord, puits surtout privés, répartis en trois zones où ils sont très rapprochés : zone du terrain de sports (eau entre 5,80 et 8,80), zone de la route d'Ikotaka (eau entre 7 et 10 mètres), zone dite du Jardin (eau entre 6,30 et 8,40 mètres) ; au Nord-Est de la ville, puits de la ferme vétérinaire et rares puits privés atteignant l'eau à des profondeurs très variables : 5 mètres dans les dépressions à 14 mètres sur les crêtes.

Au Sud-Est, les puits sont groupés dans les dépressions, où ils trouvent l'eau entre 6 et 10 mètres. D'autres puits sont isolés : puits de la Mission Protestante n° 101 et 102 (eau à 11 mètres) au Sud, puits d'Isingo n° 104 (eau à 17 mètres) à l'Ouest. Remarquons qu'il existait autrefois des zones de vovos, qui ne sont plus exploitées, d'une part au Nord-Est, dans la dépression de cote 124 à 900 mètres du marché, d'autre part dans la profonde cuvette de Mahavelo (cote 122), 800 mètres au Sud-Ouest du marché.

La puissance de la nappe n'est guère connue de façon certaine que par les sondages, car la profondeur des puits est généralement limitée à un mètre sous le niveau statique au moment du fonçage. Elle dépend évidemment des variations de la surface piézométrique. En Août 1944 l'épaisseur de la nappe était de 1,14 mètres dans le puits BESAIRIE ; en Septembre-Octobre 1954, elle variait de 0,80 mètre au sondage n° 4 à 5,75 mètres au sondage n° 1. En Avril 1958, cinq puits seulement avaient une hauteur d'eau supérieure à 1 mètre (n° 36 , 55 , 57 , 101 , 102) et deux avaient plus de deux mètres d'eau (n° 57 et 101).

Les courbes isopiézométriques de la nappe, tracées d'après les relevés d'Avril 1958 figurent planche XVI. Il a été nécessaire de ne pas tenir compte d'anomalies locales, tenant au fait que les niveaux d'eau mesurés correspondaient parfois à des niveaux dynamiques après puisage ; dans les zones de puits rapprochés, on a choisi pour l'altitude de l'eau la valeur la plus haute de la zone. La densité des puits indique les régions où les courbes sont statistiquement correctes et celles où, au contraire, elles sont fortement interpolées ; c'est le cas en particulier pour la partie à l'Est du centre de la ville, entre la route de Fort-Dauphin et les puits des cuvettes Sud-Est. Pour quelques puits asséchés en 1958, on a utilisé les relevés d'Avril 1956, en les corrigeant de la variation moyenne constatée dans la même zone.

Une première anomalie importante apparaît immédiatement : entre deux zones hautes, à plus de 119 mètres, au Nord-Est et au Nord-Ouest, se place une dépression de la nappe au Nord, que nous avons prolongée, peut-être abusivement vers le Sud, par une "vallée" de la surface piézométrique. On doit admettre que cette dépression est due à la surexploitation de la nappe dans la région Nord, déformant sa surface de manière quasi-permanente ; si le puisage était interrompu pendant plusieurs mois dans cette zone (ce qui est impossible car ce serait fermer la moitié des puits de la ville), il est pro-

bable que l'on verrait cette dépression se combler lentement, en fonction de l'alimentation de la nappe, et qu'il se formerait au contraire un dôme à son emplacement, indiquant un écoulement des eaux de la nappe depuis le Nord vers l'Ouest, le Sud et l'Est. Dans l'état actuel de l'exploitation, la plus grande partie des eaux venant du Nord est immédiatement utilisée et les eaux provenant du Nord-Est et du Nord-Ouest sont en partie déviées vers la dépression.

Une troisième zone haute, au Sud-Est, paraît totalement indépendante des premières ; l'eau s'écoule vers le Sud et le Sud-Ouest ; la nappe paraît également surexploitée dans cette région, où les puits sont trop rapprochés et interfèrent malgré la faible perméabilité des terrains. Ceci a d'ailleurs moins de conséquences pratiques que dans la zone Nord, puisque la nappe n'est pas utilisée plus au Sud.

Au Sud et à l'Ouest de la ville, nous n'avons aucune donnée sur la surface piézométrique entre les puits 104 et 103 d'une part, 101 et 102 d'autre part. La pente de la nappe doit augmenter largement, pour être à 106,5 mètres au puits n° 101, à 108,9 au puits n° 104, alors qu'elle se trouve encore à 116,6 au n° 102 et à plus de 118 mètres au n° 103. A l'Est du puits 101, la seule donnée est celle du sondage n° 5, de position non précisée, où le niveau statique aurait été en Octobre 1954 vers 123 mètres d'altitude, ce qui nous semble invraisemblable. Les courbes tracées dans cette zone sont purement figuratives ; nous proposerons une hypothèse à vérifier à propos des recherches possibles.

Les variations du niveau de la nappe sont mal connues. Comme pour toutes les nappes étudiées précédemment il n'a pas été possible jusqu'ici d'obtenir un relevé régulier dans des puits-témoins. Le chiffre de 2 mètres avancé par DECARY pour l'amplitude saisonnière paraît vraisemblable, mais il est certain que les variations sont très irrégulières, comme l'alimentation de la nappe et qu'une longue période d'observations serait nécessaire.

D'une année à l'autre, pour une même époque de l'année, les variations paraissent assez faibles. H. BESAIRIE (1955-a) a remarqué en Août 1944, après une très forte sécheresse, que le niveau de l'eau était sensiblement le même qu'en Août 1939, année pluvieuse. Pour la période 1956-1958, nous avons donné à propos de l'alimentation des nappes, quelques chiffres également faibles : abaissement de 0,12 à 0,31 mètre suivant les puits entre Avril 1956 et Août 1958, de 0,20 à 0,78 mètre pour les mêmes puits, entre Août 1957 et Avril 1958, la pluviométrie étant inférieure à la moyenne annuelle depuis 1955. Mais cet abaissement a cependant d'importantes conséquences pratiques, du fait de la faible hauteur d'eau dans les puits et surtout de la faible puissance de la nappe : la statistique suivante porte sur 105 puits recensés en Avril 1956 et 120 puits en Avril 1958 :

	<u>1956</u>	<u>1958</u>
Hauteur d'eau supérieure à 100 cm	12 puits	5 puits
Hauteur d'eau entre 50 et 100 cm	36	13
Hauteur d'eau entre 25 et 50 cm	24	22
Hauteur d'eau entre 10 et 25 cm	16	47
Hauteur d'eau inférieure à 10 cm	1	5
Puits totalement secs	16	27

Les zones les plus touchées par l'abaissement de la nappe sont évidemment celles où elle est la moins épaisse, en particulier au Nord, où nous avons vu que le mur argileux se trouvait vers 117 mètres d'altitude et où, par conséquent, la hauteur de la nappe tend à s'annuler.

DEBITS.— Les premières données au sujet des débits des puits sont dues à H. BESAIRIE, qui a observé en 1939, dans le puits de reconnaissance déjà cité un débit de 650 l/h. A la même époque, on admettait pour le puits n° 77 (dit puits carré), à la ferme vétérinaire, un débit de 7 à 8 m³ par jour. En 1949, au moment du fonçage, les puits n° 1 et 3 donnaient 1200 à 1500 l/h.

Les essais de pompage dans les sondages ne sont pas tous très concluants car, sans doute par crainte d'éboulements, les tubages n'ont pas été remontés suffisamment, et une partie de la nappe n'était pas libre.

Sondage n° 1 : Hauteur de la nappe : 5,75 m. Diamètre 165 mm. 1er essai : nappe libre sur 1,70 m à la base. Assèchement du forage en 4 min. 30 sec. pour un débit de pompe de 3000 l/h. Remontée au niveau statique en 14 min. 2ème essai : nappe libre sur 2,35 m. Débit de 6420 l/h pour un rabattement stabilisé de 1,80 mètre. Remontée au niveau statique en 5 minutes. 3ème essai : nappe libre sur 2,35 m. Assèchement du forage en 3 minutes pour un débit de pompe de 8000 l/h. Remontée au niveau statique en 5 minutes.

Sondage n° 2 : Hauteur de la nappe 2,24 m. Diamètre 191 mm. Le tubage étant resté enfoncé de 15 cm dans l'argile du mur de la nappe, l'essai ne signifie rien (débit apparent de l'ordre de 500 l/h).

Sondage n° 3 : Hauteur de la nappe 1,95 m, insuffisante pour immerger entièrement la pompe. Pas d'essai.

Sondage n° 4.— Très faibles infiltrations sur 80 cm. Pas d'essai.

Sondage n° 5 : Hauteur de la nappe 3,95 m, dont 1,60 m dans des limons pratiquement imperméables. Nappe libre sur 1,75 m dont 0,15 m seulement au sommet

dans des sables. Débit apparent de l'ordre de 240 l/h pour un rabattement (dans le tubage) de 1,45 m.

Les essais de pompage effectués dans les puits en Août 1957 et Avril-Mai 1958 ont donné des résultats très variables suivant les puits et, pour un même puits, d'une année à l'autre. Pour les faibles débits, une erreur en excès provient du trop fort débit de la pompe. Les courbes des débits, en fonction des rabattements figurent planche XVII, avec les décalages initiaux correspondant aux variations du niveau piézométrique entre les deux séries d'essais. Les débits maxima obtenus figurent dans le tableau suivant :

Puits n°	Date	Niveau statique	Hauteur d'eau	Débit l/h	Rabattement
2	8-57	18,36	1,04	860	0,69
2	5-58	18,50	0,82	1165	0,66
18	5-58	6,90	0,63	55	0,46
33	8-57	10,83	1,18	1660	0,81
36	5-58	7,28	0,97	110	0,85
57	8-57	9,01	2,49	450	2,20
57	4-58	9,38	2,22	120	2,02
83	8-57	8,23	0,90	790	0,55
101	8-57	20,22	2,53	7380	0,62
101	4-58	20,48	2,43	6206	0,64
104	8-57	16,96	0,93	2570	0,69
104	6-58	17,38	1,07	1940	0,80

Seuls les débits du puits n° 101 ont été obtenus par stabilisation du plan d'eau.

Si on compare les chiffres pour un même rabattement (planche XVII), les débits sont très faibles dans la zone Nord, où la nappe est peu épaisse et se trouve dans des sables assez argileux (avec l'exception du puits n° 33 en 1957, mais la hauteur d'eau était tombée à 0,41 m en 1958), moyens au centre et au Sud-Est, plus importants à l'Ouest (n° 104), bien que le sondage n° 4, très proche, ait montré un débit pratiquement nul, maxima au puits 101, au Sud, en accord avec les résultats du sondage n° 1 de 1954. Il serait naturellement imprudent de trop généraliser, car les débits peuvent dépendre de causes très locales de perméabilité. D'autre part, dans la plupart des puits, le mur de la nappe n'est pas atteint et la zone aquifère n'est donc pas essayée sur toute sa hauteur.

Comme pour les puits dans la nappe de Beloha, on constate que la forme des courbes de débit se modifie peu d'une année à l'autre. Par contre, plusieurs puits ne montrent pas des courbes linéaires et il apparaît

dans ces cas que la perméabilité des terrains n'est pas la même sur toute la hauteur essayée de la nappe.

QUALITE DES EAUX..- Nous disposons de nombreux essais en ce qui concerne les chlorures et la dureté totale, de plusieurs analyses de potabilité minérale, de quelques analyses chimiques complètes, mais, comme pour la plupart des nappes du Sud de Madagascar, on ne peut guère préciser que le caractère moyen des eaux car il y a de fortes variations de la concentration d'un point à un autre, tenant à des causes locales encore mal élucidées.

Dureté totale..- En tenant compte seulement des derniers essais systématiques d'Avril 1958, on constate qu'il est possible de tracer une ligne d'égale dureté 35° (voir planche XVI) qui, au moins dans la partie Nord-Ouest et Nord de la ville coïncide assez bien avec la courbe isopiézométrique 118 mètres. Il apparaît qu'à l'amont de la nappe la dureté est faible et qu'elle augmente d'autant plus que la circulation de l'eau dans la nappe est plus lente. C'est ainsi que, dans le centre de la ville, où l'écoulement normal vers le Sud est contrarié du fait de la dépression artificielle de la surface piézométrique au Nord, et où par conséquent la nappe doit être pratiquement immobile, on remarque une forte augmentation de dureté.

Une autre zone de forte dureté se trouve au Nord-Est et coïncide paradoxalement avec une région élevée de la surface piézométrique ; il faut admettre soit que les eaux alimentant la nappe sont minéralisées dès l'amont dans cette région soit que la circulation y est très lente, ce qui correspondrait assez bien avec les faibles débits constatés.

Enfin, comme pour la surface piézométrique, la région Sud-Est se comporte de façon indépendante en ce qui concerne la dureté qui augmente de l'amont vers l'aval. Les puits n° 101 au Sud avec 16° DHT et 104 à l'Ouest avec 110° DHT constituent des cas particuliers.

Cette répartition géographique mise à part, les chiffres varient très largement, de 5° DHT pour les puits n° 9, 12 et 64 à 150° pour le puits n° 104 en Avril 1956, les duretés les plus fréquentes étant comprises entre 10° et 35° et de 4° pour les puits n° 108 et 115 à 110° pour le puits n° 104 en Avril 1958, les duretés les plus fréquentes étant comprises entre 10° et 40°. On voit d'après la statistique suivante portant sur 72 puits étudiés à la fois en 1956 et 1958 qu'il y a peu de modifications malgré l'abaissement du niveau piézométrique et la diminution des débits. Les différences d'une année à l'autre sont le plus souvent dues à une intensité variable des puisages.

	<u>Avril 1956</u>	<u>Avril 1958</u>
DHT entre 1 ^o et 10 ^o	13 puits	6 puits
-id- 11 ^o et 20 ^o	21	22
-id- 21 ^o et 30 ^o	13	11
-id- 31 ^o et 40 ^o	7	8
-id- 41 ^o et 50 ^o	5	4
-id- 51 ^o et 60 ^o	4	8
-id- 61 ^o et 70 ^o	2	6
-id- 71 ^o et 80 ^o	2	2
DHT supérieur à 80 ^o	5	5

Teneur en chlorures. - La répartition des teneurs en chlorures, également très variables, est beaucoup plus incohérente que celle des duretés et il n'est pas possible de tracer des lignes d'égale salinité. Il semble que l'intensité du puisage soit ici le facteur prédominant, car les puits peu exploités ou abandonnés montrent des teneurs importantes, à proximité d'autres puits normalement utilisés à eau peu chlorurée.

En Avril 1956, les teneurs extrêmes allaient de 0,14 g/l au puits n° 18 à 4,15 g/l au puits n° 104, les chiffres les plus fréquents étant compris entre 0,25 g/l et 0,75 g/l. En avril 1958, les salinités sont très comparables, comprises entre 0,16 g/l aux puits n° 12 et 115 et 4,64 g/l au puits n° 104. Une statistique portant sur les mêmes 72 puits montre peu de variations dans le temps :

	<u>Avril 1956</u>	<u>Avril 1958</u>
NaCl entre 0,10 et 0,20 g/l..	5 puits	2 puits
-id- 0,20 et 0,30.....	10	11
-id- 0,30 et 0,40.....	10	10
-id- 0,40 et 0,50.....	7	13
-id- 0,50 et 0,60.....	13	2
-id- 0,60 et 0,70.....	3	7
-id- 0,70 et 0,80.....	7	5
-id- 0,80 et 0,90.....	1	3
-id- 0,90 et 1,00.....	3	2
-id- 1,00 et 2,00.....	10	13
NaCl supérieur à 2,00 g/l..	3	4

Potabilité. - En ce qui concerne la dureté totale et les chlorures, les eaux des puits d'Ambovombe sont évidemment médiocres, si l'on s'en tient aux normes européennes ; compte tenu de la région et du climat, on doit cependant les considérer comme bonnes, à l'exception de quelques puits d'ailleurs abandonnés ou réservés à l'abreuvement pastoral.

La potabilité organique est certainement plus sujette à caution ; nous ne disposons pas d'analyses bactériologiques, mais il est certain que la nappe est encore fort mal protégée contre les pollutions. Des analyses montraient en 1930 une forte présence de nitrites et, en 1939, des teneurs en nitrites de 6,1 mg/l au Grand Puits (n° 10), de 7 mg/l au puits Ankambana (n° 27), avec présence d'ammoniaque et de matières organiques. Les analyses récentes sont nettement meilleures, tout au moins pour les puits de la ville.

Les analyses anciennes indiquent la présence de nitrates en grande quantité, sans qu'il soit possible de dire s'ils ont une origine purement organique : 200 mg/l au puits n° 10 et 854 mg/l au puits n° 27 en 1939 (Analyses Institut Pasteur, Tananarive), 750 mg/l et 197 mg/l, sans indication exacte de provenance en 1948 (analyses de ROBILLARD). Les analyses récentes n'en font pas mention.

Analyses complètes. - Nous citerons seulement deux analyses récentes, sur des prélèvements d'Août 1958, dans les puits très utilisés n° 3, au centre de la ville et n° 101 au Sud. (Laboratoire d'Analyses Minérales, Tananarive).

	<u>N° 3</u>	<u>N° 101</u>
DHT	9°	15°
pH	7,1	7,1
Résidu sec à 105°	1215 mg/l	830 mg/l
Ca	17 -	45 -
Mg	9 -	10 -
Na	272 -	204 -
Cl	278 -	293 -
CO ₃	93 -	138 -
SO ₄	69 -	46 -

Ces analyses sont très comparables ; les eaux sont chlorurées sodiques, légèrement bicarbonatées calciques et sulfatées sodiques, avec de très faibles teneurs en magnésie.

ALIMENTATION DE LA NAPPE. - Nous avons déjà donné les caractéristiques pluviométriques à propos des conditions d'existence des nappes, et des diagrammes figurent planche VII. Avec une hauteur moyenne annuelle de 593 mm de pluies, il n'est pas douteux qu'une alimentation directe est possible ; si l'on fixe à 400 mm/an le déficit évapo-transpiratoire, la nappe pourrait recevoir annuellement, pour une surface minimum de 3 kilomètres carrés, un volume d'eau de l'ordre de 600.000 mètres-cubes (ce qui correspondrait assez bien avec les réserves possibles de la nappe, si on admet une puissance moyenne de 2 mètres et une capacité de rétention de 10 %).

Une seconde source d'alimentation qui doit d'ailleurs être prépondérante dans les périodes de cyclones, se trouve dans la plaine de Lafidava, au Nord, où les eaux, incapables de s'infiltrer dans les argiles lacustres, doivent ruisseler pour pénétrer finalement dans le barrage formé par les sables dunaires. Il est évidemment impossible de chiffrer quelles sont les quantités d'eau qui rentrent ainsi dans la nappe. La forte minéralisation dans la région Nord-Est pourrait être en relation avec ce mode d'alimentation.

EXPLOITATION DE LA NAPPE ET RECHERCHES NECESSAIRES. - Il est certain que l'exploitation de la nappe est actuellement du type anarchique : les puits de la zone Nord dépriment la nappe de façon anormale, au détriment de la qualité chimique des eaux dans les autres régions, tandis que plusieurs zones sont totalement inutilisées, pour la seule raison semble-t-il que l'eau y est un peu plus profonde.

L'alimentation en eau d'Ambovombe (environ 2000 habitants) demande 300 m³/jour en première étape et 500 m³ ultérieurement, mais ces chiffres ne tiennent pas compte de la consommation des très nombreux villages qui s'approvisionnent en eau à Ambovombe et de l'abreuvement du cheptel. En ce qui concerne ce dernier point, on devra faire appel à la nappe générale, beaucoup plus profonde et de moins bonne qualité chimique, mais probablement à fort débit.

Pour une adduction, on ne peut évidemment songer à répartir les puits sur une vaste zone, et le choix se porte à priori sur la région du puits n° 101 et du sondage n° 1, au Sud, où l'on a noté les débits maxima, encore très faibles d'ailleurs au regard des besoins. Les opinions diffèrent quant au mode de captage possible. Un premier projet (1955) prévoyait naïvement plusieurs sondages rapprochés, sans s'inquiéter du rayon d'action possible, qu'il y aurait lieu d'étudier en premier lieu. Pour J. ARCHAMBAULT (1956), le débit du sondage n° 1 correspond à une perméabilité par fissures dans des grès, donc sans possibilité de développement des sondages, tandis que H. BESAIRIE estime qu'il s'agit de sables aquifères. Le plus simple serait de reconnaître la nature exacte des terrains par un nouveau sondage.

A notre avis, le principal point à éclaircir est celui des réserves possibles de la nappe, ce qui exige tout d'abord de reconnaître son extension exacte, en particulier à l'Est et au Sud. Il faudrait en même temps établir une carte structurale du mur de la nappe pour déterminer les zones d'écoulement privilégiées s'il en existe et étudier de façon un peu précise la perméabilité des terrains qui, d'après les mesures de débit, est extrêmement variable. C'est seulement avec ces données que l'on pourra juger s'il est possible d'exploiter la nappe rationnellement

en quelques points seulement (il ne semble pas à priori que l'exploitation actuelle puisse dans ce cas être continuée) ou s'il est au contraire préférable de répartir les puits sur l'ensemble de la nappe.

A propos de la structure du mur de la nappe, nous proposons une hypothèse qui, si elle se vérifiait, pourrait modifier considérablement nos conceptions. Jusqu'ici nous avons admis implicitement que ce mur était unique, à l'altitude 115-119 mètres pour la majeure partie de la nappe, vers 103 mètres à l'Ouest et au Sud. On peut aussi concevoir une première couche argileuse, correspondant au fond actuel de la cuvette de Lafidava, s'interrompant suivant une ligne à déterminer en aval des puits 103, 102 et 88, la nappe qu'elle supporte se déversant au delà jusqu'à une seconde couche argileuse, située vers la cote 103 et correspondant à celle des puits n° 104 et 101 et des sondage n° 4 et 1.

Il est en effet anormal de voir une couche d'origine lacustre récente, partout ailleurs quasi-horizontale, présenter une rupture de pente aussi brutale (au moins 24 pour mille entre le puits n° 102 et le sondage n° 1) et la coupe du sondage Ferme Ambovombe, à 3 kilomètres, révèle de curieuses coïncidences : le toit de la première couche argileuse s'y trouve à la cote 116 et celui de la seconde, plus épaisse, dont, à priori, correspondant à un épisode lacustre plus important, et de plus grande extension, vers la cote 106. Entre ces deux couches il y a des sables fins, clairs, légèrement calcaires, avec des grès à ciment calcaire, qui peuvent être l'équivalent des sables plus ou moins consolidés du sondage n° 1 d'Ambovombe, entre 113,4 et 102,8 m.

Si cette hypothèse est exacte, la nappe inférieure, qui n'existerait qu'au Sud, serait surtout alimentée par le déversement des eaux de la nappe supérieure, mais les fluctuations de niveau y seraient moins grandes, par suite de réserves plus importantes (on remarquera la forte hauteur de la nappe au sondage n° 1) et les débits ponctuels pourraient être beaucoup plus grands, les terrains étant beaucoup moins argileux. Il reste à déterminer par sondages la ligne de "chute" de la nappe supérieure qui peut être très irrégulière. Les faibles infiltrations d'eau reconnues au sondage n° 1 entre 113,4 et 110,2, soit bien au-dessus du niveau piézométrique, pourraient être des circulations latérales issues de la première nappe et n'ayant pas encore rejoint la seconde.

NAPPE PROFONDE D'ANKITRY

Il n'y a pas lieu de s'étendre longuement sur la nappe profonde reconnue, par des moyens indirects, dans le seul sondage d'Ankity (J. AUROUZE, 1958-j), 10 kilomètres au Sud d'Ambondro, au niveau des formations d'âge inconnu décrites à propos de l'Oligocène-Miocène au chapitre Géologie.

Dans le sondage de reconnaissance, à la traversée de sables moyens peu roulés immédiatement au-dessous d'une couche d'argile plastique épaisse de 2,80 mètres dont le mur est à 129,8 mètres de profondeur, soit à l'altitude -37 mètres environ, on a constaté à la fois une variation nette de la salinité de la boue de forage et des pertes de boue importantes indiquant une bonne perméabilité. La teneur en chlorures de la boue qui était de 3,45 g/l à 129 mètres de profondeur est passée successivement à 3,35 g/l à 131,2 et 3,20 g/l à 134,25 ; en même temps les pertes de boue qui étaient de l'ordre de 50 litres par mètre de forage jusque vers 128 mètres ont atteint 220 litres par mètre à l'entrée dans la couche sableuse.

Il ne fait pour nous aucun doute que ceci corresponde à une venue d'eau sinon douce, au moins de salinité inférieure à 3,20 g/l de chlorures, avec un débit non négligeable. La nappe, qui est probablement captive sous les argiles, se trouve dans des sables épais de 2,70 mètres seulement, mais il existe au-dessous des lits dolomitiques et des sables moyens ou grossiers alternant avec des marnes et argiles jusqu'à 148,80 mètres et la salinité de la boue est restée faible jusque vers cette profondeur (3,15 g/l à 146,5 mètres).

Aucun prélèvement d'eau n'a pu être effectué et le débit n'a pas été essayé, car il aurait fallu pour cela isoler la nappe profonde de la nappe littorale trouvée au-dessus, qui était l'objectif principal du sondage.

L'extension de cette nappe dépend de celle des formations marines situées entre le socle cristallin et le Quaternaire et spécialement de l'étendue du niveau imperméable qui la protège des infiltrations marines. Si, comme on peut l'espérer, la nappe se prolonge non seulement vers l'Ouest et l'Est (elle n'existe plus à Ambovombe), mais aussi au Sud, elle pourrait être trouvée en bord de mer et remplacerait avantageusement les rares points d'eau très saumâtre exploitant la nappe littorale.

L'alimentation de cette nappe ne peut se concevoir qu'à partir des eaux de la nappe générale, dont une partie aboutirait à la nappe littorale dans le Quaternaire, tandis que l'autre resterait captive au-dessous d'un niveau argileux. Aux pertes de charge près, les niveaux piézométriques seraient les mêmes.

EAUX THERMALES

On ne connaît dans la zone étudiée que deux sources thermales, qui n'ont aucune relation avec les nappes décrites jusqu'ici et sont très différentes des sources thermales de la région de Bezaha, bien que situées dans une région voisine.

Andranomiboaka Nord (ou Ankazontaha)..- En X = 276,7 ; Y = 183,4 , à 13 km au Nord-Ouest de Betioky, le griffon de la source se trouve sur la rive gauche du thalweg Lomaka, dans le Jurassique calcaire. Le débit est de l'ordre de 5 litres/sec. et la température est de 33° C. On remarque un léger dégagement gazeux dans la vase noire au fond du griffon et une faible odeur sulfureuse. Nous donnons plus loin une analyse (P. ROSE) sur un prélèvement du 4 Août 1956, sur eau filtrée.

Ranomay .- En X = 281,65 ; Y = 184,4 , à 4,5 kilomètres au Sud de Tongobory, dans la zone d'affleurement du Jurassique moyen, cette source paraît correspondre à une petite faille. Le débit, estimé à vue, est de l'ordre de 15 à 20 l/sec et l'eau s'écoule dans un lac d'environ 50 hectares, permanent. La température dans les bassins aménagés pour les bains est de 44° C et il y a un dégagement assez important de gaz sulfureux. L'analyse ci-dessous correspond à un prélèvement du 4-8-1956 (P.ROSE).

	<u>Andranomiboaka</u>	<u>Ranomay</u>
Résidu sec à +105° C	2149 mg/l	3584 mg/l
Résidu calciné.....	2044	3470
SiO ₂	35	11
CO ₂	114	75
NO ₂	non caractérisé	Traces
NO ₃	non caractérisé	Traces
Cl	756	1342
SO ₃	324	598
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	Traces	Traces
CaO	35	426
MgO	8	34
Na ₂ O	860	1055
K ₂ O	14	48
NH ₄	non caractérisé	Traces
Degré hydrotimétrique total...	1196	702
pH	7,3	6,6
Conclusions : Andranomiboaka : Eau chlorurée et sulfatée sodique.		
Ranomay : Eau chlorurée, sulfatée alcaline et bicarbonatée alcalino-terreuse.		

II - LA NAPPE GENERALE

DEFINITION

Nous donnons le nom de nappe générale au système aquifère qui s'alimente à l'origine dans la zone d'affleurement du socle cristallin et passe successivement dans les diverses formations géologiques pour aboutir finalement au niveau de la mer le long du littoral.

Pour prévenir toute interprétation optimiste mais imprudente, il faut préciser que l'épithète "générale" ne signifie nullement que cette nappe puisse être trouvée et exploitable partout ; elle s'oppose simplement au caractère principal des nappes étudiées jusqu'ici, qui sont "localisées" dans un seul piège aquifère et le plus souvent dans une seule formation géologique.

Dans plusieurs régions, mais non dans toutes, la nappe générale correspond à la nappe de base telle que nous l'avons définie (conditions géologiques d'existence des nappes ; pièges aquifères), lorsqu'elle se trouve immédiatement au-dessus de la zone inaltérée du socle cristallin, mais elle comprend aussi la nappe littorale, même si celle-ci n'a pas le socle pour substratum et le réseau karstique de l'Eocène en continuité avec la nappe littorale dans la région Ouest. Les nappes alluviales des fleuves, alimentées par la nappe générale ou au contraire alimentant celle-ci constituent un cas particulier.

La nappe générale ainsi définie s'identifie en partie à la nappe phréatique de base de H.BESAIRIE et correspond assez exactement à l'ensemble des nappes du socle précambrien, du Néogène continental et du Quaternaire côtier définies par J.ARCHAMBAULT (1956) qui, le premier, a proposé nettement l'hypothèse d'un passage de l'eau d'une formation à l'autre et de la continuité de la surface piézométrique, en soulignant l'importance pratique de ce système aquifère.

SURFACE PIEZOMETRIQUE. - C'est précisément la continuité de la surface piézométrique qui confère son unité à la nappe générale. Sur la carte de la planche VIII ont été figurés les points d'eau et les sondages productifs (sauf à l'intérieur de la zone d'affleurement du socle et dans la région côtière où ils sont très nombreux) pour lesquels on ne peut en général pas imaginer un piège lithologique ou structural local. Les altitudes du niveau de l'eau en ces points sont telles que l'on peut tracer les lignes figurées planche VIII sans qu'apparaisse une seule anomalie incompatible avec une nappe unique. Il y a certes de vastes zones dans lesquelles nous n'avons aucune donnée et où les courbes ont été tracées par extrapolation et en fonction des hypothèses géologiques, mais il est d'autres régions, comme le Nord des bassins de Beloha et d'Ambovombe où la densité des points est telle que la continuité des lignes ne peut résulter de coïncidences fortuites⁽¹⁾.

La forme de la surface piézométrique dépend essentiellement de la perméabilité des terrains qui contiennent la nappe. En amont, c'est-à-dire dans la zone d'altération du socle et dans les parties internes des bassins sédimentaires où les schistes cristallins sont à faible profondeur, les courbes suivent assez fidèlement la surface topographique ; nous verrons plus loin qu'elles sont souvent théoriques dans cette zone car les circulations aquifères sont localisées dans les roches altérées et les alluvions. Plus au Sud, la surface piézométrique s'écarte à la fois du sol et du toit du socle cristallin ; la partie supérieure de la nappe se trouve dans le Néogène continental à perméabilité très hétérogène et elle est souvent en charge sous des niveaux imperméables ; les courbes sont plus régulières et la pente est de l'ordre de 5 pour mille dans le bassin d'Ambovombe, 3 à 4 pour mille dans celui de Beloha.

Suivant une ligne encore très imprécise qui paraît se placer en aval de la courbe isopiézométrique de 100 mètres, la majeure partie des eaux de la nappe générale passe dans les formations dunaires quaternaires, dont la perméabilité est très supérieure à celle du Néogène. D'autre part le socle cristallin

(1) Depuis la première carte de ce genre, dressée par J. ARCHAMBAULT à partir de cotes barométriques d'exactitude très inégale et avec un plus petit nombre de points, les courbes isopiézométriques de la nappe ont été modifiées à plusieurs reprises. La carte de la planche VIII diffère notablement de notre carte hydrogéologique de 1957 car les travaux récents ont apporté des données nouvelles, sans contredire l'hypothèse initiale. Il est évident que les courbes isopiézométriques devront être encore modifiées, en fonction des recherches futures et que notre carte n'est qu'une des approximations successives inévitables tant que la nappe n'est pas parfaitement reconnue partout.

au moins dans le bassin d'Ambovombe, ne soutient plus la nappe et le niveau piézométrique s'abaisse assez brutalement. Nous avons supposé qu'il en était de même dans le bassin de Beloha et un phénomène analogue, probablement encore plus rapide, doit se produire au Sud-Ouest d'Ampanihy à l'entrée de la nappe dans les calcaires du plateau Mahafaly.

Quelles que soient les modalités exactes de cette rupture de pente (falaises fossilisées dans le socle cristallin ou le Néogène) la nappe se trouve rapidement à faible altitude : moins de 25 mètres à 15 kilomètres de la mer dans le Quaternaire, probablement quelques mètres seulement au-dessus du zéro dans le réseau karstique de l'Eocène. En bordure du rivage, elle est en équilibre avec la mer dans laquelle elle se déverse et présente les caractéristiques classiques des nappes littorales : eau salée à la base, eau douce au sommet, avec zone de brassage.

Les nappes alluviales des fleuves font partie de la nappe générale en ce sens que le niveau de l'eau dans ces nappes se raccorde avec la surface piézométrique générale. Leur comportement dépend essentiellement dans cette région de la perméabilité des alluvions par rapport à celle du substratum : lorsque celui-ci est relativement imperméable, les alluvions drainent l'eau de la nappe générale et forment une dépression dans la surface piézométrique ; dans le cas inverse, la nappe alluviale se déverse latéralement dans les formations plus perméables et contribue à l'alimentation de la nappe générale.

ALIMENTATION DE LA NAPPE GENERALE. - En amont, c'est-à-dire sur les pénéplaines cristallines de l'Androy et du Mahafaly, la nappe générale est alimentée directement par les pluies qui sont partout suffisantes. Nous avons vu, à propos de la petite nappe suspendue de Tsimandaha, à Antanimora, que ce mode d'alimentation était possible à proximité de la zone sédimentaire ; il l'est à plus forte raison dans les régions plus internes mieux arrosées, où la pluviométrie annuelle est supérieure à 600 mm. Le ruissellement ne joue un rôle qu'au moment des fortes pluies provoquant la crue des rivières qui peuvent alors, temporairement, alimenter la nappe dans la zone d'altération du socle ; les études de détail effectuées (Bekily, Antanimora, Ampanihy) montrent qu'au contraire, c'est la nappe générale qui alimente en sécheresse les écoulements des thalwegs.

Dans le Néogène continental, la nappe est alimentée essentiellement par la nappe du socle précambrien et, tout à fait localement, par le ruissellement dans les thalwegs passant du socle au sédimentaire, comme la rivière d'Antanimora qui, même en périodes de fortes crues, ne coule jamais plus de 15 kilomètres au delà d'Antanimora. La part de l'alimentation directe est sans doute faible dans la zone Néogène, en raison de la médiocre perméabilité des sols et elle est évidemment nulle lorsque la nappe générale est captive, mais on

peut penser qu'il existe des zones d'infiltration privilégiées auxquelles les eaux peuvent parvenir par ruissellement (zones d'épandages des thalwegs du bassin fermé d'Ambovombe par exemple).

Dans les formations dunaires, les possibilités de percolation des pluies augmentent, mais la pluviosité diminue. L'existence de nappes suspendues montre qu'une alimentation directe faible est possible au moins dans la région orientale. Au Nord-Ouest du Cap Sainte Marie la nappe générale ne peut plus guère être alimentée qu'indirectement, par déversement des nappes alluviales et des nappes suspendues.

Dans le plateau calcaire Mahafaly, la rareté des pluies est en partie compensée par la possibilité d'infiltration quasi-instantanée et le réseau karstique général doit être alimenté à la fois par les pluies dans la zone centrale du plateau et par le déversement des nappes suspendues. Par contre, la nappe littorale dans le Quaternaire de la côte Ouest est à peu près certainement alimentée uniquement par le réseau de l'Eocène, en équilibre avec elle.

EXTENSION. - Les points d'eau et sondages figurant planche VIII suffisent à montrer l'extension actuellement connue de la nappe générale, en dehors de la zone côtière où elle existe à peu près partout, mais la continuité de la nappe n'implique pas que l'on puisse trouver de l'eau en tous les points de la région couverte par les courbes isopiézométriques et, à fortiori, dans les zones où la nappe générale est pour le moment non reconnue. Les variations de perméabilité, tant latéralement que verticalement, déterminent des pièges aquifères, en général du type morphologique, communiquant entre eux, plus ou moins facilement d'ailleurs, tandis que certaines zones peuvent être totalement stériles.

En d'autres termes, pour qu'un sondage soit productif, il est nécessaire et, le plus souvent, suffisant qu'il traverse des terrains perméables entre la surface piézométrique théorique et le toit du socle cristallin compact (planche II), quelle que soit la nature de la perméabilité (interstices ou fissures), sous réserve cependant que ces zones perméables ne soient pas entièrement isolées (fissuration locale ou lentille sableuse), sans alimentation possible.

Si la formation perméable est au niveau de la surface piézométrique théorique, la nappe est libre ; si au contraire cette formation se situe au dessous de la surface piézométrique, la nappe se trouve en charge et remonte dans le sondage jusqu'à cette surface. Nous verrons que le cas est fréquemment réalisé dans le Néogène continental et le socle cristallin.

Lorsque l'ensemble des terrains sédimentaires est imperméable au-dessous de la surface piézométrique, la nappe générale n'existe que dans la zone d'altération du socle cristallin. Le sondage est négatif lorsque le socle est immédiatement compact et à plus forte raison si le sommet du Précambrien sain est au-dessus de la surface piézométrique théorique. Jusqu'à maintenant tous les échecs des sondages peuvent être facilement expliqués, beaucoup d'entre eux n'ayant d'ailleurs pas atteint le socle et certains étant même restés au-dessus de la surface piézométrique possible.

Le fait de trouver la nappe générale ne signifie pas que cette nappe soit exploitable au point considéré, car la perméabilité peut être insuffisante pour que le débit soit intéressant (cas de la région d'Ampanihy) et la salinité de l'eau peut être supérieure à la limite admissible (nombreux cas dans le bassin d'Ambovombe et la zone côtière).

En fonction de la nature des terrains dans lesquels elle circule et de l'importance plus ou moins grande de l'alimentation, la nappe générale présente des caractères particuliers suivant les régions, que nous allons étudier successivement, d'abord selon un ordre géologique en suivant la nappe de l'amont vers l'aval et, à l'intérieur de chaque paragraphe, dans un ordre régional.

NAPPE GENERALE DANS LE SOCLE CRISTALLIN

ZONE D'AFFLEUREMENT DU SOCLE. - A l'exception des quelques nappes suspendues, dont les eaux rejoignent d'ailleurs finalement la nappe générale, tous les points d'eau dans la région d'affleurement du socle cristallin font partie de la nappe générale. Celle-ci existe partout où la base de la zone d'altération superficielle est au-dessous du niveau piézométrique, mais la nappe est exploitée surtout dans les alluvions des vallées qui forment des zones de circulation privilégiées.

Points d'eau. - D'une façon très générale, lorsqu'elle se trouve dans les schistes cristallins, la nappe est exploitée par puits dans lesquels l'eau est le plus souvent à moins de 10 mètres de profondeur. En dehors des localités importantes les puits sont rares car ils ne sont pas d'un usage courant, mais la nappe générale a été reconnue également dans toutes les exploitations minières (P.BRENON, 1955) et on peut dire qu'elle existe partout, à l'exception des zones particulièrement élevées (inselbergen par exemple) et de celles où l'érosion récente a enlevé la zone d'altération ancienne, mettant à nu le socle inaltéré ; c'est le cas dans une partie des bassins de la Menarandra et du Manambovo.

La plupart des petites vallées, qui sont très nombreuses, sont dépourvues d'écoulement superficiel, sauf après de fortes pluies, mais présentent un sous-écoulement permanent dans les alluvions sableuses, qui, dans la majorité des cas, ont une meilleure perméabilité que les schistes cristallins et drainent par conséquent les eaux de la nappe. Ce sous-écoulement se traduit par des flaques d'eau dans les points bas du lit mineur sableux des ruisseaux asséchés et, si la nappe n'affleure pas, les vovos creusés dans les alluvions atteignent généralement l'eau à quelques décimètres de profondeur. C'est sous cette forme que la nappe générale dans le socle est le plus souvent exploitée, non seulement parce que la profondeur de l'eau, en terrain meuble, est très faible, mais aussi parce que les débits et la qualité de l'eau (au moins en ce qui concerne les chlorures) sont souvent meilleurs que dans les puits.

Les sondages ne sont guère utiles dans cette zone où il suffit, pour creuser un puits, presque à coup sûr de choisir un point pas trop élevé dans une région où les roches soient très altérées en surface et, pour déterminer la profondeur de la nappe, de comparer l'altitude du point à celle des sous-écoulements des thalwegs proches. Les deux forages effectués, l'un près de Kokomba dans un thalweg sec, l'autre à Jafaro, sur un plateau de sables néogènes dans le bassin du Manambovo, ont trouvé l'eau respectivement à 7 m et 10 m de profondeur, le premier dans des schistes cristallins peu altérés jusqu'à 24 m, donnant un très faible débit, le second dans des gneiss diaclasés reposant à 11,2 m sur un granite compact. La très faible épaisseur de la nappe dans ce dernier cas s'explique par la position relativement élevée du sondage.

Forme et variations de la nappe. - Comme pour toutes les nappes libres à faible profondeur, la surface piézométrique épouse d'assez près la forme de la surface du sol, d'autant que la faible perméabilité des roches autorise des gradients élevés, souvent supérieurs à 10 pour mille. Des ruptures de pentes brutales peuvent se produire, lorsque le mur de la nappe, le cristallin sain, est irrégulier : bancs rocheux inaltérés, éventuellement dykes de roches éruptives formant barrages pour la nappe. Dans les alluvions des thalwegs, la pente moyenne est généralement celle du lit, mais il existe des exceptions, en particulier dans plusieurs affluents de droite de la Menarandra où le sous-écoulement est localisé dans certaines parties du cours, l'eau repassant dans les schistes cristallins quand les alluvions sont au-dessus de la surface piézométrique générale. La forme du lit rocheux détermine en outre des poches alluviales souvent séparées les unes des autres par des biefs sans sous-écoulement.

Les variations du niveau piézométrique sont en relation directe avec les précipitations ; on peut remarquer que les variations sont plus importantes dans les puits des schistes cristallins pour lesquels il n'y a qu'un très lent drainage souterrain, que dans les sous-écoulements qui, en saison sèche,

continuent à drainer régulièrement les énormes réserves de la nappe. Celle-ci tend alors à s'aplatir et peut s'assécher dans les régions hautes si l'épaisseur de la zone d'altération n'est pas suffisante.

Dans les puits, l'amplitude des variations paraît être d'environ deux mètres en année moyenne et pourrait atteindre 3 mètres en cas de sécheresse exceptionnelle. Pour les sous-écoulements l'amplitude serait de l'ordre de 1 mètre, exceptionnellement 1,5 m, sans tenir compte évidemment des crues des ruisseaux, qui peuvent atteindre plusieurs mètres au-dessus du lit mineur.

Débits. - En ce qui concerne les puits, on verra plus loin les chiffres relatifs à ceux d'Ampanihy. D'une façon générale, on peut dire qu'un puits dans les schistes cristallins débitant plus de 1000 litres/heure est excellent. Le plus souvent, pour un rabattement de 1 mètre, les débits sont inférieurs à 500 l/h. Les courbes figurant planche XVII ont des allures semblables : le débit croît régulièrement mais faiblement en même temps que le rabattement ; il dépend essentiellement du degré d'altération des roches et de l'épaisseur de la couche altérée et il est d'autant plus important que le diamètre du puits est plus grand.

Le sondage de Kokomba n'a montré qu'un très faible suintement évalué à 20 litres/heure. Celui de Jafaro a donné en Septembre 1955 240 l/h pour un rabattement de 1,2 mètres, égal à l'épaisseur de la couche aquifère.

Les vovos en sous-écoulement ont des débits beaucoup plus importants. Nous ne disposons que d'un seul essai effectué dans les alluvions de la Sakatovo à Ampanihy en Septembre 1957 ; les sables aquifères, épais de 0,40 m seulement ont fourni près de 4000 l/h, tandis que les schistes cristallins altérés, creusés sur 60 cm au-dessous des alluvions, n'ont donné que quelque 1000 l/h supplémentaires.

Qualité des eaux. - Salinités et durestés sont extrêmement variables d'un point à un autre, même à faible distance, sans qu'il soit actuellement possible d'expliquer ces différences. Tout ce qu'on peut dire pour le moment, c'est que ces variations sont en relation avec les débits demandés aux points d'eau, mais d'autres facteurs interviennent certainement : origine plus ou moins récente des infiltrations, vitesse de circulation de la nappe, solubilité des roches, évaporation dans les puits de grand diamètre.

Sur l'origine même de la salure des eaux du socle précambrien, toujours plus forte que les teneurs observées généralement dans les massifs de roches cristallines, les opinions diffèrent largement : pour J. ARCHAMBAULT (1956), ces minéralisations élevées sont liées, sans aucun doute, à la nature même des formations où les roches métamorphiques de type basique prédominent, tandis que H. BESAIRIE estime que les hautes teneurs salines sont le fait d'une déficience

de circulation des eaux et d'une concentration par évapotranspiration. Nous ne choisirons pas entre ces deux hypothèses extrêmes, qui ne s'excluent d'ailleurs peut-être pas l'une l'autre, car la solution du problème exige une étude géochimique que nous n'avons pas entreprise et pour laquelle on manque encore d'ailleurs de matériaux.

Nous resterons donc dans le domaine des faits constatés : la minéralisation de l'eau est, en moyenne, plus forte dans les puits exploitant la nappe dans les schistes cristallins que dans les sous-écoulements ; à Ejeda, par exemple, à la même époque (Mai 1956), le sous-écoulement de la Linta titrait 0,05 g/l de NaCl et 19° DHT, tandis que le puits du marché donnait une eau à 0,21 g/l de chlorures et 35° hydrotimétriques.

Si l'on considère toutes les mesures faites, en mettant à part quelques cas aberrants attribuables à des causes locales, on aboutit aux chiffres suivants :

Teneur en chlorures :

	Teneurs extrêmes	Teneurs les plus fréquentes
Sous-écoulements	0,04 à 0,34 g/l	0,06 à 0,10 g/l
Puits	0,06 à 1,0 g/l	0,15 à 0,25 g/l

Dureté totale :

Sous-écoulements	4° à 35°	10° à 15°
Puits	10° à 80°	25° à 35°

Aussi bien dans les schistes cristallins que dans les alluvions, on trouve parfois des eaux particulièrement minéralisées : A Ampanihy, quelques puits peu utilisés titrent entre 1 et 2 g/l de chlorures, avec des duretés supérieures à 100° ; dans les régions au Nord et à l'Ouest du bassin de Beloha, plusieurs vovos en sous-écoulements donnent de l'eau saumâtre (0,92 g/l à Andamilamy, 2,25 g/l à Antsira Ouest, 2,28 g/l à Andavakitikita, 2,80 g/l à Bepondy) bien qu'ils soient tous très exploités ; les maxima connus sont atteints dans la région de Tsihombe où H.BESAIRIE a relevé des teneurs de 4 g/l dans le puits de la mission catholique de Tsihombe, de 10 à 17 g/l dans les puits de la mine de mica de Sakamasy ; le sous-écoulement de la rivière Sakamasy titrait lui-même 2,74 g/l de chlorures au radier de la route Tsihombe-Ambovombe et 0,48 g/l au radier de la Mine, mais seulement 0,16 g/l à mi-distance entre ces deux points.

De fortes teneurs en nitrates sont également signalées par R.de RO-BILLARD dans la nappe du socle, à Ejeda (50,7 - 72 - 77 mg/l), Antanimora (229 mg/l) et Ampanihy (voir plus loin). Les rares analyses complètes montrent des teneurs assez fortes en magnésie.

ETUDE DE DETAIL A AMPANIHY. - La nappe générale du socle est exploitée à Ampanihy (X=158 ; Y=228,5) par 13 puits dans les schistes cristallins et par des vovos dans le sous-écoulement de la rivière Sakatovo, affluent de la Menarandra (voir carte au 1/5.000 planche IX).

Forme et variations de la nappe. - Dans les puits, la profondeur de l'eau sous le sol est comprise suivant les points entre 3,65 m au puits n°11 et 10,25 m au puits n°13 (mesures de Juillet 1957). Le nivellement effectué permet de tracer les courbes isopiézométriques de la nappe (planche IX) qui, en Juillet 1956, montrent une pente de 10 à 15 pour mille depuis le Nord-Ouest de la localité vers le Sud-Est, avec inflexion des courbes vers la Sakatovo d'une part, vers un petit thalweg (sans sous-écoulement dans ses alluvions) à l'Est d'autre part.

L'amplitude des variations saisonnières n'a jamais été mesurée de façon précise ; plusieurs puits tarissent en fin de saison sèche et, d'après les hauteurs d'eau observées en Juillet 1956 et Juillet 1957, elle pourrait être d'environ 2,5 mètres. Entre les deux séries de mesures on constate une légère remontée du niveau statique dans la plupart des puits en 1957, sans que la forme de la surface piézométrique soit sensiblement modifiée.

Débits. - Les essais de pompage effectués en Juillet 1957 (puits n° 1, 4, 6 et 8) et Juin 1958 (puits n° 5 et 7) ont montré les débits maxima suivants, tous calculés d'après les courbes limnigraphiques :

<u>Puits</u>	<u>Débit</u>	<u>Rabatement</u>	<u>Diamètre</u>
1	1530 l/h	1,58 m	2,50
4	525	1,26	3,00
5	215	0,57	2,00
6	2920	2,24	1,90
7	2400	2,34	3,40
8	770	1,70	3,10

Les courbes de débit, planche XVII, permettent de comparer les puits ; seuls ceux du Sud-Est de la ville, à l'aval de la nappe (N°6 et 7) donnent des débits intéressants (pour la région) ; sans doute y a-t-il là une zone où les gneiss sont altérés plus fortement qu'ailleurs.

Qualité des eaux. - En Juillet 1957, la teneur en chlorures était comprise entre 0,10 g/l au puits n°4 et 2 g/l au puits n°13, et la dureté totale entre 40° au puits n°5 et plus de 250° au puits n°13.

D'autres mesures avaient été effectuées en Août 1944 (H.BESAIRIE), 1949 (R.PAVLOVSKY) et Juillet 1956 (J.AUROUZE). Si l'on compare les chiffres entre eux pour une même année et pour un même puits à diverses années (toutes les mesures ont été faites en saison sèche), on aboutit aux conclusions suivantes :

- La salinité et la dureté sont maxima dans la région Nord-Ouest de la ville avec plus de 0,70 g/l de chlorures et plus de 100° hydrotimétriques.

- La salinité et la dureté sont minima dans la région Est de la ville (puits n°3 à 7), avec moins de 0,5 g/l de NaCl et moins de 50° DHT.

- La salinité augmente lorsque les puits sont peu utilisés (n° 8, 10, 13) et diminue dans le cas contraire (n° 1, 7).

- Il n'y a pas de relation directe entre la minéralisation et le débit.

En ce qui concerne la potabilité, nous disposons de trois analyses complètes, une analyse de potabilité minérale et d'aucune analyse bactériologique. Il est certain que le puits n°13, à proximité immédiate d'un cimetière, est fortement pollué (il n'est d'ailleurs plus utilisé) et la position des puits n° 5, 6 et 7, en aval de la ville, n'est pas favorable à une bonne potabilité organique des eaux. Une analyse de Mai 1956 de l'eau du puits n°7 est cependant satisfaisante.

En dehors des teneurs en chlorures et des duretés, qui sont supérieures aux normes des pays tempérés mais restent acceptables pour la région dans les puits de l'Est de la ville, on relève dans les analyses de 1947 et 1948 (R.de ROBILLARD) des teneurs extrêmement fortes en nitrate de soude, comprises entre 235 et 1010 mg/l. L'eau du sous-écoulement de la Sakatovo, qui est d'ailleurs certainement polluée, a des teneurs en chlorures très variables suivant les saisons ; les mesures sont comprises entre 0,18 et 0,46 g/l de NaCl et entre 31° et 84° hydrotimétriques.

Conclusions sur l'alimentation en eau de la ville. - Une adduction normale devrait prévoir environ 300 m³ d'eau par jour. Dans l'état actuel des puits, il est impossible d'extraire ce débit de la nappe dans les schistes cristallins et, même en approfondissant les puits de meilleur débit (n° 6 et 7), dont l'eau est acceptable, jusqu'au socle inaltéré, il est très probable que l'on ne dépasserait pas 150 m³/jour, en déprimant constamment la nappe au maximum.

La seule solution consisterait à capter le sous-écoulement de la rivière Sakatovo en un point, qui reste à déterminer, où les alluvions seraient particulièrement épaisses, avec de graves inconvénients en ce qui

concerne la qualité de l'eau, très variable, les pollutions et surtout les violentes crues de la rivière.

REGION D'ANDRANOABO. - Entre le plateau de Vohitsara au Nord et la Linta au Sud, la nappe générale dans le socle précambrien, en dehors de la zone d'affleurement des schistes cristallins, n'est guère connue que dans les puits d'Andranoabo.

Dans le puits Nord (X=226,8 ; Y=199,6) creusé dans des alluvions anciennes à la limite Néogène - cristallin, le débit paraît extrêmement faible (quelques litres par heure). Dans les puits et vovos Sud (X=225 ; Y=199,4), qui atteignent probablement les gneiss sous les sables roux, l'eau titre entre 0,09 et 0,18 g/l de NaCl et 8 à 17° DHT. Là encore un puits inutilisé montrait à la même époque une minéralisation beaucoup plus forte (0,87 g/l NaCl et 66° DHT).

Les débits mesurés en Septembre 1957, le niveau statique étant à 1,97 m, et en Juillet 1958 après abaissement du niveau de 87 cm sont passés de 1040 l/h à 244 l/h pour une même profondeur du plan d'eau rabattu (3,70 m). Les courbes de débit indiquent que la partie supérieure de la nappe doit se trouver dans le Néogène lorsque le niveau piézométrique est élevé (1957) et que la nappe était localisée dans les gneiss en 1958 (c'est pourquoi, sur la planche XVII les courbes figurent dans le diagramme du Néogène).

Plus au Sud, l'existence de la nappe est douteuse car le Sénonien supérieur repose directement sur le socle précambrien qui n'a donc pas pu subir l'altération tertiaire ; il serait tout de même important de vérifier le fait par quelques sondages, car la région est très pauvre en eau, mais il serait bon d'étudier au préalable par géophysique la topographie du toit du socle qui montre au moins un point haut au Sud-Sud-Ouest d'Ejeda. Il est possible que la majeure partie des eaux de la nappe générale soit drainée par la nappe alluviale de la Linta sans pouvoir passer directement dans les calcaires éocènes du plateau Mahafaly.

REGION SUD-OUEST D'AMPANIHY. - Dans le bassin néogène du Sud-Ouest d'Ampanihy, la nappe générale est actuellement inconnue dans le socle précambrien. Le sondage Ankenta a bien atteint des micaschistes à biotite et grenat avec, d'après le seul échantillon communiqué, une zone d'arénisation au-dessus, mais nous ignorons si des essais ont été effectués. Le sondage Teranombitelo, en Février 1953, a trouvé à 20 mètres de profondeur des gneiss graphiteux très kaolinisés, non aquifères ; de très faibles suintements dans le Néogène, évalués à 5 l/h, n'ont même pas été retrouvés dans le puits creusé ultérieurement.

Ces données sont insuffisantes pour condamner à priori à l'échec les recherches dans cette zone. Nous estimons au contraire que la nappe générale, qui a un débit extrêmement faible et inutilisable dans le Néogène très argileux doit être recherchée dans la zone d'altération du socle qui est seule susceptible d'une perméabilité convenable. La rareté des points d'eau permanents dans cette vaste région justifie d'ailleurs des recherches importantes, même si les résultats doivent être médiocres. Le problème est de reconnaître la structure du toit du Précambrien, qui n'est certainement pas aussi régulière que ne l'indique notre carte (planche II), pour forer à l'aplomb des points bas constituant des pièges morphologiques. Des prospections électriques sont en cours.

BASSIN DE BELOHA. - Dans presque toute la partie Nord du bassin néogène de Beloha, le toit du socle précambrien est à faible profondeur (voir coupe 8, planche III^b) et la nappe générale a été trouvée en plusieurs points dans les gneiss altérés.

Plateau de Lovokarefo. - Quatre sondages ont été effectués en 1955 dans le plateau de Lovokarefo. A l'extrême Nord, le sondage I a bien trouvé des quartzites altérés sur une dizaine de mètres, mais le toit des quartzites compacts est à l'altitude 310, alors que le niveau piézométrique général est voisin de 300 m. La nappe n'existe donc pas.

Le sondage II a trouvé la nappe dans une arène gneissique à 14 m de profondeur (altitude 275) et, immédiatement au-dessous, une pyroxénite très diaclasée est également aquifère. Le débit de 1200 l/h pour un rabattement de 1 m d'une eau titrant 1,37 g/l de NaCl, dans un sondage de 107 mm de diamètre, montre que ce sont surtout les fissures qui sont productives.

Il en est de même au sondage III où la nappe est dans des gneiss à graphite irrégulièrement altérés et diaclasés. L'eau est remontée de 8,50 à 4,85 m dans le sondage et le débit était de 2000 litres/heure pour un rabattement stabilisé à 8,80 m, d'une eau titrant seulement 0,4 g/l de NaCl.

Au sondage IV, la nappe est libre, à 8,75 m de profondeur, dans des gneiss à graphite et grenat régulièrement altérés ; les carottes ne montrent pas de fissures. Le débit est seulement de 600 l/h pour un rabattement de 6,25 m. La teneur en chlorures était de 0,4 g/l. On peut remarquer qu'aucun des trois sondages positifs n'a atteint la base de la zone d'altération et que la nappe n'a donc pas été reconnue sur toute sa hauteur.

Région au Nord de Beloha. - La nappe générale n'est connue que par les sondages d'Ankilibehara, Ambaro et Antsira, sur le glacis néogène du Nord de Beloha. Dans le premier, l'eau est dans un banc de gneiss micacé altéré, pulvérulent, intercalé entre des leptynites compactes, avec une puissance apparente de 6,50 m (la puissance réelle est certainement plus faible en raison du pendage) ; la nappe est très légèrement en charge, avec une remontée de 9,5 m à 8,6 m de profondeur ; le débit est de 500 l/h pour un rabattement de 1,40 m ; la teneur en chlorures est de 2,2 g/l.

La nappe est également en légère charge à Ambaro, dans des arènes quartzo-feldspathiques épaisses de 7,6 m, sous des argiles néogènes, avec une remontée de 0,40 m seulement. Le débit est extrêmement faible (25 l/h pour un rabattement de 2,50 m) et il n'y a aucune chance de l'augmenter, les gneiss étant inaltérés au-dessous.

A Antsira, la partie supérieure de la nappe est exploitée par des vovos dans les formations néogènes. Le sondage de 1953 a donné un débit de 3000 l/h, sans indication du rabattement, provenant sans doute en majeure partie de fissures dans des leptynites entre 10 et 15 m de profondeur. Le débit des vovos est certainement très inférieur à ce chiffre. Dans le sondage, l'eau titrait 0,7 g/l de NaCl. L'eau des vovos avait également 0,74 g/l en 1944 (H.BESAIRIE) et, en Mai 1958, il y avait un seul vovo productif, avec quelques centimètres d'eau à 10 m sous le sol.

Les faibles débits de la nappe dans les sondages d'Ankilibehara et Ambaro s'expliquent fort bien par leur position dans une zone élevée du toit du Précambrien, qui ne bénéficie pas des eaux de la zone d'affleurement du socle, drainées vers la Menarandra, et dispose seulement de l'alimentation directe qui est faible. Le sondage Antsira, au Sud-Est, dans le thalweg de la Betay, est au contraire en aval d'une vaste zone d'alimentation et la zone d'altération est beaucoup plus épaisse.

Région de Tsimilofo. - Il existe plusieurs points d'eau dans la nappe générale dans la région centrale du bassin de Beloha, mais la plupart des vovos ne paraissent pas atteindre le socle cristallin, sauf peut-être les puits de Tsimilofo, approfondis jusqu'à 10 mètres en saison sèche.

Dans le sondage Tsimilofo I (Maromaso), la nappe générale est dans des bancs altérés intercalés entre des bancs compacts de leptynites à grenat, de 12 à 27 m de profondeur, et l'eau est remontée de 6 m dans le forage, soit à la cote 220 environ. Le débit de 2000 l/h d'une eau à 0,9 g/l de NaCl est probablement en relation avec une circulation préférentielle sous le thalweg Noga, remblayé par des alluvions anciennes.

On s'explique par contre très mal l'échec apparent du sondage Tsimilofo II, également dans un thalweg, qui a traversé des arènes et gneiss altérés jusqu'à la cote 190 environ, alors que le niveau piézométrique théorique est certainement supérieur ; le rapport d'essai est parfaitement incompréhensible, car il mentionne de l'eau à 2 mètres de profondeur avant essai et un débit de pompe de 1000 l/h pendant 3 heures, avec en conclusion : pas de formation aquifère(1).

Le sondage Andranolava, un peu plus à l'Est, dans le thalweg Imaririny a trouvé la nappe dans des cipolins, à 10,10 m de profondeur, à l'altitude 179. L'eau titrait 0,4 g/l de NaCl et, après un pompage de 7 m³, 45° hydrotimétriques ; le rapport d'essai indique un débit de 2000 l/h, sans précision du rabattement.

Autres régions. - La nappe générale dans le socle n'est pas connue dans les autres régions. Le sondage Ambolotsifa, au Sud-Est de Beloha, a touché à 52 m des leptynites très kaolinisées, non aquifères. Les autres forages n'ont pas atteint le Précambrien.

Il est certain que, du fait de l'approfondissement du bassin sédimentaire vers le Sud, la recherche de la zone d'altération du socle sous le plateau Karimbola n'a pas d'intérêt pratique. Cette zone n'existe d'ailleurs probablement pas sous les formations éocènes.

La recherche de la nappe générale dans le socle, qui n'est utile que si le Néogène ne fournit pas des débits suffisants, doit donc être localisée au Nord d'une ligne Tsihombe-Ampotaka et les zones à priori les plus intéressantes sont les dépressions du toit du cristallin signalées (planche II) au Nord-Est de Kirimosa et suivant la faille du Cap Sainte Marie.

BASSIN D'AMBOVOMBE. - En dehors de quelques vovos à la limite cristallin-sédimentaire au Sud-Est d'Antanimora (Andranomasy, Andranosira) donnant une eau permanente à 3 m sous le sol, trois sondages seulement, très distants les uns des autres, ont traversé la partie supérieure, aquifère, du socle précambrien.

Au PK.328,5, sur la rive gauche de la rivière d'Antanimora, presque constamment sèche, la nappe est à 8,5 m de profondeur, en charge sous des argiles sableuses, avec remontée de 2,30 m, dans des gneiss à graphite et des arènes quartzo-feldspathiques non traversées entièrement. Le débit relative-

(1) Il y a là un excellent exemple, parmi beaucoup trop d'autre, de la nécessité d'un contrôle technique des travaux.

ment important de 960 l/h pour un rabattement de 2,5 m et la faible minéralisation (0,12 g/l NaCl) indiquent que le thalweg constitue une zone de circulation rapide des eaux de la nappe, bien alimentée par le sous-écoulement qui existe jusqu'à l'aval immédiat d'Antanimora.

Au Sud-Ouest et au Sud-Est de ce sondage, le Précambrien est stérile à Imangoro et Sakaomby, sans zone d'altération.

Au sondage d'Erada, une trentaine de kilomètres au Sud, la nappe générale est à la fois dans des granites altérés entre 115 et 127 m de profondeur et dans les arènes quartzo-feldspathiques dont le toit est à 100 m. Le niveau piézométrique est à 89 m de profondeur, à l'altitude 122 m. Un essai de pompage dans le forage de reconnaissance a donné 1500 l/h pour un rabattement voisin de 22 mètres d'une eau à 1,2 g/l de chlorures et 50° DHT. Dans le forage d'exploitation, mais avant remontée des tubages provisoires fermant une partie de la nappe, le débit est passé à 2000 l/h environ, pour un rabattement de 20 mètres.

Encore 20 kilomètres plus au Sud, à Tsianoha, les données sont très imprécises, du fait de la non fermeture de la nappe salée de Ihodo dont les eaux se mêlaient dans le sondage à celles de la nappe générale, qui se trouve à la fois dans le Néogène et dans le socle. Le niveau piézométrique de la nappe générale paraît voisin de la cote +21 m (63 m de profondeur) et le débit provenant de la seule zone d'altération du socle, de 87 m à 100 m, peut être estimé à 400 litres/heure, la salinité étant de l'ordre de 4 g/l de NaCl. Le socle, non altéré, n'est pas aquifère dans le second sondage Tsianoha.

La nappe générale n'existe pas dans le Précambrien à Ankitry, au Sud d'Ambondro (voir nappe profonde d'Ankitry). Au sondage Ferme Ambovombe, le socle supporte la nappe générale, mais ne paraît pas être lui-même aquifère.

En résumé, nos connaissances sont encore insuffisantes dans cette zone. Il semble que la perméabilité du sommet des schistes cristallins soit surtout une perméabilité d'interstices, d'où des débits médiocres. La recherche de la nappe est possible dans le triangle limité par les deux failles figurant planche II et l'isobathe 0 du toit du socle, mais il est à peu près certain qu'il existe dans cette zone, et surtout vers l'Ouest, des inselbergen du socle sur lesquels la nappe n'existe pas. Par contre, on peut espérer trouver d'épaisses formations aréniques au pied de ces inselbergen. Pour ce qu'on en connaît, la minéralisation de la nappe dans le socle est relativement faible ; elle est certainement minimum à proximité des zones d'infiltration constituées par les thalwegs.

MASSIF VOLCANIQUE DE L'ANDROY.- Dans les deux sondages Ambatolahy et Ankatra-fay, les coulées volcaniques du massif de l'Androy ne sont pas aquifères ; les fissures sont colmatées par des dépôts secondaires de calcite ou silice et ces laves constituent le mur de la nappe générale dans le Néogène.

Il n'est pas exclu qu'il existe des zones de fissures ouvertes ou des intercalations de formations volcaniques meubles, soit entre les coulées, soit à leur base, au contact du socle précambrien, mais il est évident que la recherche par sondages de telles zones perméables, susceptibles d'être aquifères, est extrêmement hasardeuse et difficile, du fait de la dureté des roches à traverser. On ignore d'ailleurs totalement l'épaisseur possible des coulées.

Dans la zone d'affleurement du massif volcanique, les points d'eau se trouvent dans les ruisseaux. La rivière Ikonda, affluent du Mandrare, a un écoulement pérenne ; plusieurs retenues d'eau se trouvent dans la Valovoky (avec concentration de l'eau par évaporation, jusqu'à 1,45 g/l de chlorures et 50^o hydrotimétriques) ; la Sakafangitsa a un sous-écoulement permanent en aval de Tsimisira. Il est difficile de dire si ces vallées sont alimentées par une nappe (ou un réseau) dans les coulées volcaniques, ou si elles ne recueillent que les eaux de ruissellement. La pluviosité annuelle dans cette région atteint 700 mm.

CONCLUSIONS.- La zone d'altération du socle cristallin est le réservoir le plus inférieur possible pour la nappe générale et l'expérience montre qu'il peut contenir des eaux de qualité acceptable, avec des débits soit importants lorsque les gneiss sont diaclasés, soit médiocres dans le cas d'une altération régulière. A condition que la profondeur de ce réservoir ne dépasse pas les limites de l'appareil et les possibilités pratiques d'exploitation, si on ne peut prévoir une remontée suffisante de l'eau, il est indispensable de le rechercher dans tous les cas où les débits et la salinité de la partie supérieure de la nappe générale ne sont pas satisfaisants.

Aucun sondage ne devrait donc être déclaré négatif s'il n'a pas atteint des schistes cristallins inaltérés.

NAPPE GENERALE DANS LE NEOGENE CONTINENTAL

Alimentée principalement par le débordement de la nappe du socle précambrien, accessoirement par le ruissellement issu des pénéplaines cristallines et par les précipitations, la nappe générale se trouve dans les formations du Néogène continental lorsque sa puissance dépasse celle de la zone d'altération du socle. On ne la connaît, très inégalement, que dans les bassins d'Ampanihy, Beloha et Ambovombe, avec des caractéristiques très différentes suivant la perméabilité des formations qui la contiennent.

BASSIN D'AMPANIHY. - On a vu que le Néogène continental est essentiellement argileux, au moins dans sa partie supérieure, seule connue, dans la région d'Ampanihy. En dehors de la dépression d'Itrobeka, à l'Est du plateau de Ranomasy, les points où la nappe générale est connue par sondages ne fournissent que des débits insignifiants.

Points d'eau et sondages du Sud du bassin. - Les deux petits vovos d'Antaimby ($X=128,3$; $Y=224,1$), à très faible débit mais permanents correspondent seuls à la nappe générale : l'eau est dans des sables blancs alluviaux, reposant vers 3 mètres sur des sables argileux et ce mode de gisement rappelle assez les nappes suspendues de Beloha et Ambondro. Le niveau statique se raccorde cependant à celui de la nappe générale, et on peut supposer que les bancs gneissiques inaltérés formant un barrage souterrain 1500 m à l'Est des vovos ne sont pas étrangers à l'accumulation de la nappe dans cette région. L'eau est très douce, avec 0,04 g/l de NaCl et 4° DHT ; le débit dans le sondage de 1953 était de 80 l/h.

Six autres sondages ont été effectués dans cette région en 1953 ; sauf celui de Teranombitelo, déjà cité, qui a trouvé le socle précambrien kaolinisé et stérile à 20 m, tous sont restés dans des sables argileux à intercalations d'argiles franches, avec de très faibles suintements d'eau, tous inférieurs à 10 l/h. Les niveaux statiques se raccordent cependant fort bien (voir planche VIII) et on peut penser qu'il s'agit de la nappe générale, peut-être grossie à cette époque par des pluies importantes, car les eaux sont partout très faiblement minéralisées (moins de 0,05 g/l de chlorures).

Dépression d'Itrobeka. - Sur 17 kilomètres Nord-Sud, et suivant l'axe de la dépression topographique dite d'Itrobeka, entre le plateau néogène à l'Est et la falaise orientale du plateau calcaire Mahafaly à l'Ouest, s'alignent une vingtaine de points d'eau exploitant la partie supérieure d'une nappe dont le niveau piézométrique, partout à moins de 3 mètres sous le sol, est incliné du Nord (230 m à Betangirika) vers le Sud (170 m à Itrobeka). Tous les vovos sont creusés dans des sables roux ou jaunâtres superficiels, mais les déblais des recherches anciennes à Betangirika et les coupes des sondages Itakaka et Iandamoty, ainsi que quelques affleurements de grès ferrugineux, montrent que le Néogène continental est immédiatement au-dessous.

La plupart des vovos paraissent avoir de très faibles débits, sauf à l'extrême Sud où, dans le puits Ouest d'Itrobeka, des essais de pompage ont montré un débit de 2390 l/h pour un rabattement de 0,60 m en Juillet 1957 et de 1034 l/h pour un rabattement de 0,52 m en Juin 1958, le niveau statique s'étant abaissé de 55 cm entre les deux mesures. Les courbes de débit (planche XVII) indiquent nettement que la perméabilité varie verticalement.

L'eau est partout très peu minéralisée avec, au maximum, en Septembre 1956, 0,25 g/l de chlorures et 20° hydrotimétriques, sauf dans les points d'eau abandonnés. En 1949, R. PAVLOVSKY a relevé des chiffres un peu plus élevés, atteignant 0,35 g/l de NaCl et 37° DHT.

Il est à peu près certain que la nappe d'Itrobeka correspond à la nappe générale dans le Néogène, dont seule la partie supérieure, dans les alluvions plus ou moins évoluées remblayant une ancienne vallée, est exploitée. Le niveau piézométrique de la nappe est parfaitement compatible avec celui des sondages du Sud du bassin d'Ampanihy (planche VIII) et, à Betangirika Nord, un puits creusé en 1949 aurait montré d'autres niveaux aquifères à 12 et 14 m de profondeur, le dernier ayant un débit important.

La faible minéralisation de l'eau et l'amplitude des variations saisonnières du niveau de la nappe, qui serait de l'ordre de 3 mètres à Itrobeka, prouvent cependant que la nappe est alimentée en partie par ruissellement sur les sables roux, principalement à partir du plateau Est.

BASSIN DE BELOHA - Points d'eau. - Tous les points d'eau exploitant la nappe générale dans le Néogène du bassin de Beloha sont situés dans des thalwegs tributaires de l'Imaririny, affluent de droite du Manambovo, thalweg d'ailleurs à peine creusés et dont le fond est occupé par des alluvions anciennes très évoluées.

Malgré cette position, il ne s'agit pas de vovos en sous-écoulement : la nappe se trouve effectivement dans le Néogène, sous les alluvions, et n'apparaît dans celles-ci qu'en périodes de crues. Il est probable, cependant, qu'une telle position des points d'eau ne correspond pas seulement au fait que la nappe est moins profonde qu'ailleurs ; la perméabilité du Néogène est peut-être plus grande le long de ce réseau hydrographique qui doit être très ancien et qui, surtout, collecte la majeure partie des eaux de ruissellement, d'où une suralimentation locale de la nappe et une meilleure qualité de l'eau.

Suivant l'Imaririny, à partir des affleurements du socle cristallin, on trouve successivement les vovos d'Andranombomba, Iboboka et Belitsaka, dont les eaux titrent moins de 0,10 g/l de NaCl et 20° DHT. Le sondage Andranolava, déjà cité, avec nappe générale dans le Précambrien, est dans le même thalweg. Plus en aval, dans les vovos d'Antrehaky, près de la route Tsihombe-Beloha, l'eau est vers 5 mètres sous le sol en saison sèche et la minéralisation est variable suivant les trous, tous utilisés cependant. En Mai 1958, le débit était de 1230 l/h pour un rabattement de 0,58 m dans un des vovos ; après pompage de 1200 litres et remontée de l'eau à son niveau statique, on a noté une légère augmentation de la salinité, de 0,13 à 0,16 g/l de NaCl et de 36° à 39° DHT, qui semble bien indiquer la superposition d'une tranche d'eau douce, provenant d'infiltrations récentes, sur une nappe plus minéralisée en profondeur.

Dans la vallée Noga, tributaire de l'Imaririny en aval d'Antrehaky, le vovo de Tsimilofo atteint la nappe en saison sèche à 10 m de profondeur. Dans des puits actuellement abandonnés, l'eau était à 6,5 m en 1944 et trait 0,30 g/l de chlorures et 40° DHT (H.BESAIRIE).

Egalement dans la Noga, les vovos d'Ambatofoty donnent des débits médiocres : 470 l/h en Août 1957 et 244 l/h en Juin 1958 pour un rabattement d'environ 1 mètre ; la qualité de l'eau n'a pratiquement pas varié pendant les pompages.

Plus en aval dans l'Imaririny, les vovos d'Antafiambe, creusés seulement après assèchement des mares, atteignent la nappe vers 5 mètres dans des sables argileux grossiers. En Décembre 1955, la teneur en chlorures était de 2,3 g/l avec une dureté de 140°.

Sondages. - Dans la région orientale du bassin de Beloha, à l'Est de la faille du Cap Sainte Marie, le sondage Beantsiva a trouvé la nappe générale à 25,5 m dans des argiles gréseuses et le débit indiqué de 2400 l/h pour un rabattement de 0,50 m s'explique fort mal. La teneur en chlorures (2 g/l) est beaucoup plus forte que dans les vovos des thalwegs Ouest. Le forage de Famatalefo, dans la même région, est resté sec dans des grès argileux et argiles (voir planche V).

Dans la région même de Beloha, la nappe générale existe dans les quatre sondages de Bevaro, Beloha, Masina et Isampaiza et son niveau piézométrique est à moins de 25 m de profondeur. Elle est totalement indépendante de la nappe phréatique des sables blancs et sa minéralisation est beaucoup plus forte : 2,3 g/l de chlorures à Beloha, près de 3 g/l à Bevaro, 5,2 g/l à Isampaiza, sondage le plus méridional. La salinité n'est pas connue à Masina, où les deux nappes n'ont pas été séparées dans l'essai de pompage. Une analyse sur l'eau du sondage Beloha montre une forte teneur en magnésie (302 mg/l).

Les débits relativement forts indiqués à Bevaro et Beloha (3000 l/h et 3600 l/h, sans mention du rabattement) proviennent presque certainement de fissures dans des grès. Pour Isampaiza, où il y aurait seulement 180 l/h, les conditions d'essai et en particulier la position des tubages ne sont pas précisées et le débit réel est peut-être plus important.

A l'Ouest de Beloha, les sondages Kilimiary et Kirimosa n'ont pas touché de formation aquifère. Les causes de l'échec de Kilimiary sont obscures ; à Kirimosa, le niveau piézométrique général est probablement très peu au-dessous du fond du forage, qui n'a pas atteint le socle cristallin.

Conclusions. - La perméabilité du Néogène continental dans le bassin de Beloha est nettement supérieure à celle des formations équivalentes du bassin d'Ampa-

nihy et plusieurs sondages montrent que l'on peut y trouver des débits exploitables. Le principal problème qui se pose est celui de la salinité de l'eau, qui est plus forte que dans la zone d'affleurement du socle. Il semble que cette concentration soit en relation avec la durée de la circulation dans le Néogène : elle est plus faible dans les vovos des thalwegs, où l'écoulement de la nappe générale doit être assez rapide, que dans les sondages, et elle augmente de l'amont de la nappe vers l'aval, aussi bien dans les vovos (Antafiambe) que dans les sondages (Isampaiza). Les débits ne sont un peu importants que lorsque les roches contenant la nappe sont fissurées.

Notre méconnaissance de la géologie profonde du plateau Karimbola ne permet que des hypothèses sur la nappe générale dans cette région. Si les formations argileuses trouvées à Lavanono sont effectivement néogènes et reposent sur l'Eocène, la nappe doit passer assez rapidement dans les calcaires, avec abaissement brutal de la surface piézométrique, d'où une profondeur beaucoup plus grande à donner aux recherches et le risque de trouver des eaux saumâtres à proximité du rivage.

BASSIN D'AMBOVOMBE - Région d'Andrananivo. - En bordure Ouest du bassin d'Ambovombe, dans une avancée des formations sédimentaires dans l'épéron de Tsihombe correspondant sans doute à une dépression du toit du socle, se trouvent plusieurs mares de grandes dimensions réputées permanentes. La principale, Andrananivo, est habitée par des crocodiles. Ces mares sont certainement l'affleurement d'une nappe aquifère que nous identifions avec la nappe générale, compte tenu des altitudes. Les variations saisonnières de niveau, de l'ordre de 2 m au maximum, sont en relation avec celles de la nappe et non avec l'évaporation qui assèche rapidement d'autres mares, aussi profondes, de la région mais alimentées seulement par ruissellement. En 1958, après plusieurs années de sécheresse il subsistait encore un peu d'eau à Andrananivo.

Deux kilomètres au Sud-Est, les puits de Betaranta, creusés en 1921, exploitent la même nappe qui se trouve dans des sables très fins, argileux, au moins à sa partie supérieure. On a relevé les caractéristiques suivantes :

1921 : eau entre 5,75 et 6 m de profondeur.

Août 1939 : eau entre 3,70 et 5 m, NaCl = 0,1 g/l, DHT = 6°.

Avril 1956 : eau à 3 m, NaCl = 0,08 g/l, DHT = 7° dans le seul puits productif.

Avril 1958 : eau à 5,50 m, NaCl = 0,11, DHT = 12° dans le puits Nord, refait.

Le débit est seulement de 220 l/h pour un rabattement de 1,43 m.

Région d'Erada-Laparoy. - Nous avons déjà examiné les résultats du sondage Erada, où la nappe générale est à la fois dans le socle et la partie inférieure du Néogène, probablement en charge sous les sables très argileux du sommet du Néogène. Le sondage de Laparoy, une dizaine de kilomètres au Nord est resté sec

à 65,80 m de profondeur. Le niveau piézométrique de la nappe générale se trouve, d'après nos interpolations, vers 35 m de profondeur, mais le Néogène est entièrement imperméable au-dessous de ce niveau avec des argiles et des grès compacts (voir log, planche V) ; la nappe peut exister au-dessous et remonterait au niveau statique théorique.

Région d'Ambaliandro. - Sur une superficie d'environ cent kilomètres carrés dans la partie amont de la cuvette d'Ambaliandro-Ampamolora, quatre sondages sur sept ont atteint la nappe générale dans le Néogène, dans des conditions hydrogéologiques assez semblables, les trois sondages négatifs n'ayant pas étudié d'ailleurs l'ensemble de la formation.

Trois des sondages positifs (Ambaliandro II, Ambaliandro I, PK.349,2) sont alignés du Nord-Ouest au Sud-Est dans l'axe topographique de la dépression. Dans les deux premiers, la nappe a été trouvée en charge, sous un niveau imperméable (qualifié d'argiles rouges compactes par le sondeur mais qui, d'après quelques débris de carottes retrouvés sur le chantier en 1955, serait plutôt une cuirasse ferrugineuse pisolithique) à 34 et 38 m de profondeur, le niveau piézométrique s'établissant à 11,5 et 12 m.

Les débits indiqués, respectivement de 4800 l/h et 4000 l/h, sont incompatibles avec les sables argileux mentionnés par le sondeur comme contenant la nappe. Il est très probable qu'il s'agit plutôt de roches dures (conglomérats ou cherts siliceux) fissurées. Le puits foncé ultérieurement à Ambaliandro I a d'ailleurs été arrêté par force sur un niveau de ce genre, non signalé dans la coupe du sondage, vers 40 m de profondeur.

L'eau est de qualité très médiocre avec 5,9 g/l et 3,2 g/l de chlorures et des teneurs assez fortes en magnésie (244 mg en MgO, en Juillet 1956, dans le puits d'Ambaliandro I).

Dans le sondage du PK.349,2, quelques kilomètres au Sud-Est, la nappe se trouverait à 20 m de profondeur, dans un chert siliceux (voir log, planche V) et le niveau statique est à 10 m de profondeur. Le débit était en 1955 de 4000 l/h d'une eau titrant 9,9 g/l de NaCl, au-dessus de la teneur admissible pour une exploitation.

Cependant, d'après la première interprétation d'un sondage électrique effectué en Novembre 1958 au droit du forage, les terrains aquifères ont une résistivité apparente plus forte que celle concevable avec la teneur de 9,9 g/l de chlorures. D'après la coupe du forage, on peut se demander s'il n'existe pas deux niveaux aquifères, le premier, tout à fait local, dans des fissures à 20 m de profondeur, avec nappe pratiquement immobile très minéralisée, le second sous des marnes brun-rouge à 48 m de profondeur qui correspondrait au niveau aquifère des sondages d'Ambaliandro I et II. L'eau analysée serait celle du niveau supérieur, la pompe ayant été placée, pendant l'essai, à 20 m de pro-

fondeur⁽¹⁾.

Dans le même alignement, plus au Sud-Est, le sondage Ambaliandro III a été négatif, à 59 m de profondeur ; il est probable que la nappe générale se trouve au-dessous, également en charge. Il en est de même au sondage de Manavy, à l'autre extrémité de l'alignement, qui est resté dans des argiles (log, planche V), ainsi qu'à Tsikoaka, 7 kilomètres plus à l'Est.

A Ianakara, la nappe est dans un conglomérat à ciment calcaire, sous des grès ferrugineux et l'eau remonte de 54 à 12 mètres de profondeur. Le débit de pompage de 3600 l/h n'aurait provoqué aucun rabattement, mais l'eau titre 9 grammes par litre de chlorures.

Il est pour le moment impossible d'expliquer non seulement les fortes minéralisations de l'eau dans cette région, mais aussi les grandes différences entre des points rapprochés, dans une nappe indiscutablement unique. Il faut supposer d'une part une très lente circulation de l'eau (mais on ignore toujours l'origine des chlorures), d'autre part une division de la nappe dans des fissures ou des chenaux perméables, certaines zones, sans issue, étant pratiquement immobiles.

Ambatolahy-Ankatrafay. - Au Nord et au Nord-Est du bassin, le Néogène continental est aquifère au-dessus des coulées volcaniques. A Ambatolahy, la nappe générale est localisée dans un conglomérat à ciment calcaire, fissuré, épais de 2,50 m environ, sous des marnes sableuses. L'eau remonte de 24 à 16 mètres. Le débit est de 1750 l/h pour plan d'eau stabilisé immédiatement au-dessous du conglomérat. La salinité a varié de 1,3 g/l à 0,65 g/l de chlorures et de 55° à 29° DHT, suivant les dates de prélèvements, avec une nette diminution de la minéralisation par pompage.

A Ankatrafay (voir coupe, planche V), le Néogène est très hétérogène, avec alternance de niveaux perméables et imperméables. Le mode de forage et l'absence de carottage électrique ne permettent pas de préciser quels sont exactement les niveaux aquifères. On sait seulement que le niveau piézométrique est à 51 m de profondeur et que, dans le forage développé par pistonage, le débit est de 7500 l/h pour un rabattement de 1,34 m seulement ; autant que l'on puisse extrapoler, le débit maximum pourrait être de plusieurs dizaines de mètres cubes à l'heure.

La teneur en chlorures, qui était de 2,3 g/l dans le sondage de reconnaissance est passée à 0,70 g/l après pompage dans le sondage d'exploitation et la dureté totale s'est stabilisée vers 30°.

(1) On ne peut exclure totalement l'hypothèse d'une teneur d'étiquetage des échantillons, l'essai du sondage Ianakara ayant eu lieu la veille.

Le débit important ne paraît pas uniquement en relation avec la puissance de la nappe (45 m). Il est fort possible, comme nous l'avons vu au chapitre Géologie, qu'il existe une dépression ou vallée ancienne entre le Mandrara et la cuvette d'Ampamolora, drainant actuellement la majorité des eaux de la nappe générale dans cette région.

Conclusions. - La nappe générale dans le Néogène continental du bassin d'Ambovombe a, partout où elle est connue jusqu'ici, un débit utilisable, en relation avec la nature des sédiments qui sont plus grossiers dans ce bassin et avec la fissuration des roches. Dans la région d'Ambaliandro, la nappe est assez fortement en charge, mais on ne peut en aucun cas espérer des débits jaillissants.

La question essentielle est celle de la qualité des eaux qui, sauf dans les points d'eau de la région d'Andrananivo, à proximité immédiate de la zone d'alimentation, est toujours médiocre, et souvent très mauvaise. Les prospections électriques donneront sans doute d'utiles renseignements sur ce point.

Dans la partie Nord du bassin, au-dessus des formations volcaniques, le seuil d'Etoly est favorable aux recherches et on peut espérer y trouver, comme à Ankatrafay, des débits importants pour la région.

La nappe générale n'est certainement plus dans le Néogène continental dans la partie méridionale du bassin, et un problème primordial à résoudre, du point de vue pratique, est celui de la position du passage dans les formations quaternaires : en amont, on peut espérer trouver la nappe à profondeur raisonnable, compte tenu de l'altitude du sol, en aval, il n'y a aucun espoir de l'exploiter de façon économique, en dehors de quelques points relativement bas. De la position de la rupture de pente du niveau piézométrique dépend donc l'alimentation en eau d'une très vaste région qui ne dispose actuellement d'aucun puits permanent.

NAPPE GENERALE DANS L'EOCENE

Le raccord entre la nappe du socle cristallin et du Néogène continental avec le réseau karstique de l'Eocène calcaire est encore loin d'être bien établi, d'autant que tous les points d'eau correspondant à ce réseau sont situés au Nord du parallèle d'Itampolo, à proximité de la zone côtière et que nous n'avons aucune donnée hydrogéologique entre cette région et les affleurements du socle cristallin au Nord de la Linta.

Au reste, il est évident qu'il ne peut y avoir communication directe entre la nappe du socle et la nappe de l'Eocène dans la région au Nord du parallèle d'Andranoabo, où la série sédimentaire est très épaisse. Ce n'est qu'à partir de la Linta, dont les eaux, issues du Précambrien, se perdent dans les calcaires éocènes, que l'on peut être certain que le réseau est alimenté, au moins en partie, par la nappe générale.

Dans le bassin d'Ampanihy et, si nos hypothèses sur la géologie du plateau Karimbola sont exactes, dans la partie occidentale du bassin de Beloha, le passage de la nappe générale des formations néogènes peu perméables aux calcaires éocènes, que l'on peut, à priori, supposer fissurés presque partout, doit être extrêmement brutal, les eaux rejoignant très rapidement le niveau de base du réseau karstique, qui est ici le niveau de la mer, aux pertes de charge près. La détermination de la zone de "chute" de la nappe est, du point de vue pratique, très importante dans le plateau Karimbola.

Ajoutons que, bien qu'il n'y ait pas de point d'eau dans l'Eocène au Sud du parallèle d'Itampolo, l'existence de circulations importantes dans les calcaires du Sud du plateau Mahafaly est prouvée par celle de la nappe littorale dans le Quaternaire côtier, pour laquelle il est impossible d'admettre une alimentation directe, malgré le faible minimum pluviométrique que nous avons adopté, et qui ne peut donc être alimentée que par passage latéral de la nappe de l'Eocène aux sables et grès dunaires.

En restant maintenant dans le domaine des faits connus, nous décrivons sommairement les principaux types de points d'eau : sources, avens et puits.

SOURCES. - Les sources ou, pour reprendre le terme consacré par l'usage, les résurgences, sont localisées aux environs de l'estuaire de l'Onilahy, à la base de la falaise calcaire, au niveau de la mer pour les sources de Soalara, un peu au-dessus du niveau des eaux de l'Onilahy pour celles d'Ambolo-naondry. D'autres résurgences, non étudiées ici, sont situées au Nord du fleuve. Toutes sont situées dans l'Eocène à Alvéolines.

Les résurgences de Soalara, à l'Est immédiat du port, ont été étudiées en détail par J. de SAINT OURS (1956). Le griffon Sud semble correspondre à une diaclase ; le débit est de l'ordre de 1 à 2 litres/seconde et varie avec la marée ; les émergences Nord paraissent sortir de joints de stratification et leur débit total dépasserait 20 litres/seconde.

La salinité est variable suivant les émergences et suivant les marées ; il y a d'autre part des différences importantes entre les chiffres relevés en Août 1944 par H. BESAIRIE et ceux de Février 1955, qui prouvent que la teneur en sel n'est pas due uniquement aux eaux de mer : 1,7 à 4 g/l de NaCl en 1944,

avec 59° à 94° DHT et 1,0 à 1,4 g/l en 1955. En Octobre 1956, J.ARCHAMBAULT (1957) trouve 1,8 à 2 g/l de chlorures et signale une émergence sous-marine au delà des griffons Nord.

Pour H.BESAIRIE, les sources proviennent d'infiltrations des eaux de l'Onilahy. En fait, si l'Onilahy contribue effectivement à l'alimentation du réseau karstique, il est très probable que la majorité des eaux a une autre origine (déversement des nappes perchées et infiltrations directes dans les calcaires du plateau). Le terme d'exurgences serait alors plus exact pour ces sources.

D'autres sources du même genre se trouvent un peu au Nord-Est, dans la vallée de Lovokampy et à la base de la falaise, rive gauche de l'Onilahy (Andranomanenty).

A Lovokampy, pour les deux émergences principales, J.de SAINT OURS a mesuré en Février 1955, à marée basse, un débit total de 10 litres/seconde, la teneur minimum en chlorures étant de 0,6 g/l.

Les sources d'Andranomanenty et Andriakely donnent un débit important, non mesuré, d'une eau titrant 0,7 et 1,2 g/l de NaCl avec 40° et 45° hydrotimétriques en Septembre 1956.

Les sources situées plus à l'Est, toujours sur la rive gauche de l'Onilahy, à la base de la falaise calcaire, ont été reconnues en Septembre 1956. On en compte une dizaine aux environs du village Bereoky, mais il est fort possible qu'il en existe d'autres plus en amont du fleuve. Les principales sont celles d'Ambolonaondry et d'Andranoloza, qui servent à l'irrigation.

La minéralisation de l'eau est très inférieure à celle des résurgences de bord de mer : 0,12 à 0,16 g/l de chlorures, 21° à 30° hydrotimétriques. Il est certain que les eaux sont à l'abri des contaminations marines, mais on peut penser en outre que l'influence des eaux de l'Onilahy est ici prépondérante.

Beaucoup plus au Sud, en bordure Est du lac Tsimanampetsotsa, vers X=225 ; Y=127, à la base de la falaise calcaire, J.ARCHAMBAULT (1957) a reconnu une source, Andranohomby, à débit impossible à évaluer mais probablement important, dont l'eau, très limpide, contraste avec l'eau trouble du Lac. En Octobre l'eau titrait 1,78 g/l de NaCl et 65° DHT, alors que l'eau du Lac avait 12,8 g/l de chlorures et 1000° hydrotimétriques.

Il est très probable que le Lac Tsimanampetsotsa, lagune à l'origine, mais maintenant au-dessus du niveau de la mer, est alimenté par la nappe en réseau de l'Eocène, dont l'écoulement vers la mer n'est pas libre, du fait du barrage formé par les vases de la dépression. La source d'Andranohomby est un des exutoires du réseau karstique mais il existe certainement d'autres sources

du même type (la région n'a pas été étudiée en détail) et des correspondances sous-lacustres avec la nappe des calcaires (un aven de 90 m de profondeur aurait été repéré au Sud d'Andranohomby). La forte minéralisation de l'eau du Lac, très variable suivant les points, provient d'une part du lessivage des vases marines anciennes, d'autre part et surtout de l'évaporation.

AVENS. - Plusieurs des cavités de la partie occidentale du plateau calcaire dénommée plus haut "zone des avens" atteignent le réseau aquifère de l'Eocène. (Dans la plupart des cas, ces cavités mériteraient mieux le nom de gouffres d'effondrement, mais le terme "aven", consacré par l'usage et appliqué aussi aux cavités du même genre dans les grès à ciment calcaire quaternaires est conservé ici). De nombreux avens n'ont d'ailleurs pas été visités et des découvertes d'autres points d'eau naturels sont très possibles dans cette région.

Aucun nivellement n'a été effectué, aussi n'est-il pas possible de dire quel est le niveau piézométrique exact de la nappe. Il y a tout lieu de penser cependant qu'il est peu au-dessus du niveau de la mer.

Tous les avens connus sont situés dans les calcaires à Alvéolines. A l'extrême Nord de la zone, au Nord-Est du Lac Tsimanampetsotsa, on connaît les points Malazamanga et Mitoho ; celui-ci montre 2 à 3 mètres d'eau à 16 m sous le sol, avec des poissons aveugles ; l'examen détaillé des parois ne fait apparaître aucun chenal de grandes dimensions (J.ARCHAMBAULT, 1957). Les mesures de salinité donnent des résultats peu variables, avec 1,8 g/l de NaCl et 80° DHT en 1950, 1,65 g/l et 70° en 1956.

A une soixantaine de kilomètres plus au Sud, les quatre avens du groupe d'Andramanoetse sont les seuls points d'eau connus du plateau calcaire à l'Ouest de la nappe de Beomby (à 40 km) et de la source Andraky (à 30 km). La nappe affleure au fond, vers 25 à 40 m de profondeur, avec une hauteur d'eau maximum de 6 m à Andramanoetsebe. Les salinités relevées sont comprises entre 0,56 et 0,80 g/l de chlorures, 37° et 60° DHT. Sauf l'aven de Lalia, où la descente est impossible pour les boeufs, ces points d'eau sont très utilisés pour l'abreuvement pastoral.

PUITS. - Le puits d'Ankaranila, 11,5 kilomètres au Sud de Soalara, est situé immédiatement à la base de l'escarpement du plateau calcaire. Le sondage n°3 de 1944 a trouvé des calcaires compacts entre 20 et 22 m, non aquifères, puis des calcaires lités avec couches d'argile très sableuse ; la nappe est à 22 mètres et son niveau piézométrique est 1,5 m au-dessus, à 21,5 m sous le sol. La salinité varie de 2,0 à 2,5 g/l et de 70° à 86° DHT, suivant les époques de prélèvement. Le débit n'a pas été mesuré.

Le puits le plus important est celui du PK.35 du Sakoa-Mozambique (ou Ambilalialika), creusé en 1944 sur les indications de H.BESAIRIE, à l'extrémité Ouest du couloir d'Itombona. L'eau est à 23,50m sous le sol, dans des calcaires très fissurés (pertes d'eau d'injection dans le sondage de 1944) et on remonte assez fréquemment des poissons cavernicoles. Le débit, estimé dès 1944 à plus de 3600 l/h, a été essayé en Juillet 1958, la hauteur d'eau dans le puits étant de 1,33 m : pour un débit de pompage de 6145 l/h on n'a noté aucun rabattement ; le niveau de l'eau s'est au contraire élevé de 2 cm, ce qui doit correspondre à la désobstruction de fissures par pompage intense. La salinité de l'eau s'est stabilisée à 1,10 g/l de chlorures et 59° DHT.

CONCLUSIONS. - La nappe en réseau de l'Eocène n'est actuellement connue que par les points d'eau naturels et, sauf dans deux puits, aucune recherche n'a été faite pour l'exploiter rationnellement. Elle dispose certainement de réserves très importantes et les débits ponctuels, du fait des fissures, peuvent être supérieurs à ceux des autres nappes. Un grave inconvénient est la grande profondeur de la nappe dans la majeure partie du plateau Mahafaly, mais une étude topographique détaillée montrerait certainement des points favorables dans les cuvettes. La zone des avens peut, en tous cas, être équipée rapidement, la nappe devant se trouver partout à moins de 50 mètres ; la localisation des principaux axes de circulation souterraine devrait être possible par les méthodes spéléologiques et la profondeur plus grande que dans la zone côtière quaternaire est largement compensée par une meilleure qualité chimique de l'eau, à l'abri du brassage par les eaux marines. Le risque de pollutions organiques, si fréquent dans les eaux des réseaux karstiques d'autres régions du globe, est ici minime, la zone d'alimentation de la nappe étant pratiquement inhabitée.

NAPPE GENERALE DANS LE QUATERNAIRE

La nappe générale n'est actuellement connue dans le Quaternaire que dans la zone littorale et elle y présente toutes les caractéristiques des nappes de bord de mer, qu'il n'est pas nécessaire de rappeler ici.

La continuité de la nappe dans le Quaternaire avec le réseau karstique de l'Eocène est évidente dans la région Ouest, où nous avons vu qu'aucune alimentation directe n'était possible et où, dans la mesure où ils sont connus, les niveaux piézométriques coïncident (entre l'Onilahy et le Lac Tsimanampetsotsa).

Le raccord entre la nappe générale dans le Néogène continental et la nappe littorale est beaucoup moins bien établi au Sud des bassins de Beloha et d'Ambovombe. On a vu précédemment que la position et les modalités du passage

de la nappe d'une formation dans l'autre, marqué par une rupture de pente de la surface piézométrique, étaient loin d'être parfaitement connues. Les premiers jalons du raccord, que sont les sondages d'Ankitry et Ferme Ambovombe, la disproportion entre les réserves de la nappe littorale, qui paraissent énormes, et les possibilités locales d'alimentation permettent de considérer comme hautement probable la continuité de la nappe entre les deux niveaux.

La description de tous les points d'eau de la nappe littorale, qui sont très nombreux, et dont la première étude détaillée est due à R.PAVLOVSKY (1949-1950-1951) serait fastidieuse et, en outre, inutile car ils se groupent facilement, d'après leur position géologique et topographique, en un petit nombre de types, les caractéristiques étant très semblables à l'intérieur de chaque groupe, à la minéralisation près qui est extrêmement variable d'un point à un autre, mais assez constante dans le temps, et qui n'a pas d'intérêt du point de vue génétique puisqu'elle est presque toujours en relation avec les influences marines.

Nous étudierons donc tout d'abord les principaux types de points d'eau, pour décrire ensuite les caractéristiques régionales de la nappe littorale.

TYPES DE POINTS D'EAU - Sondages dans les sables littoraux anciens. - La nappe générale se trouve en partie dans les formations littorales attribuées au Quaternaire ancien dans les deux sondages d'Ankitry et Ferme Ambovombe que nous étudierons au dernier paragraphe.

Résurgences de bord de mer. - Dans la région d'Itampolo, on connaît trois sources en bord de mer, dans la zone de balancement des marées ; il n'est pas exclu qu'il en existe d'autres ailleurs. A Lambetabe et Lambetakamasay, l'eau sort de fissures dans des grès compacts et le débit paraît important ; à Mahadrano, les griffons sont masqués par les sables de plage et le débit global pourrait être de l'ordre de 100 litres/seconde. La salinité est essentiellement fonction des marées et ces sources ne sont utilisables que quelques heures par jour. Elles témoignent d'une circulation de type karstique dans les grès à ciment calcaire, qui n'exclut d'ailleurs pas une circulation diffuse, plus lente, par perméabilité d'interstices.

Avens dans les grès à ciment calcaire. - De dimensions et formes très variables (1 à 50 mètres de diamètre, 1 à 30 mètres de profondeur), les avens dans les grès à ciment calcaire peuvent atteindre le réseau aquifère de la même façon que ceux du plateau calcaire (il s'agit d'ailleurs également de gouffres d'effondrement). Beaucoup de vovos résultent de l'aménagement de

petits avens et, dans plusieurs cas, lorsque le niveau piézométrique n'est pas atteint, des puits creusés au fond de l'aven trouvent l'eau à faible profondeur.

La hauteur d'eau est parfois très grande : 24 m à Antaneotsy, 21 m à Andranobory et les débits qu'il serait possible d'extraire sont considérables, mais l'utilisation est conditionnée actuellement par les facilités de descendre jusqu'à l'eau.

Puits et vovos dans les grès à ciment calcaire.- Les puits et les vovos creusés dans les grès à ciment calcaire trouvent l'eau dans des fissures ou dans des couches plus sableuses interstratifiées ; l'épaisseur de la tranche d'eau douce au-dessus de l'eau salée est fonction de l'alimentation et elle peut ne pas exister lorsqu'il n'y a pas de perméabilité au-dessus du niveau de la mer, qui est pratiquement le niveau piézométrique (une difficulté pour la détermination précise de ce niveau provient de la non-définition du zéro marin, car l'amplitude des marées n'est pas négligeable : 0,40 m en moyenne et 0,60 m au maximum à Fort-Dauphin, 2,80 m en moyenne et 3,20 m au maximum à Tuléar).

Les sondages effectués à proximité du rivage entre le Mandrare et le Cap Sainte Marie montrent bien le caractère discontinu des zones de perméabilité : plusieurs d'entre eux sont restés totalement secs et d'autres n'ont trouvé, au-dessous du niveau de la mer, que de l'eau trop saumâtre pour être utilisable, parfois de l'eau de mer, alors que des vovos à proximité immédiate exploitent une eau à la rigueur convenable.

Puits et vovos dans les vases marines.- Bien que les terrains contiennent une assez grande proportion de sels, il existe des points d'eau relativement douce dans les plaines à végétation halophile correspondant à d'anciennes lagunes, en général situées en arrière des dunes récentes, mais le débit utilisable est le plus souvent extrêmement faible. La nappe paraît contenue fréquemment dans un mince lit sableux immédiatement au-dessous des vases superficiels. La salinité, toujours forte, est très variable entre des points rapprochés (cas du puits et du vovo de Bevoalava) et on trouve parfois à proximité des mares permanentes très fortement salées (jusqu'à 100 g/l de chlorures à Ranovony, au Nord d'Itampolo).

Puits et vovos dans les dunes récentes.- Bien que situés souvent plus près de la mer que la plupart des points d'eau dans les grès à ciment calcaire, les puits et vovos exploitant la nappe littorale dans les dunes récentes non consolidées, ont assez souvent des eaux faiblement minéralisées, avec moins de 1 g/l de chlorures, ce qui est peu pour la région.

Ce fait ne semble pas en relation avec une faible hauteur d'eau dans le puits ou un faible débit : c'est ainsi qu'à Anakao haut, le puits Sud débitant près de 3000 l/h et ayant une hauteur d'eau de 60 cm en Septembre 1957 donnait une eau à 0,70 g/l de NaCl, sans variation par pompage.

Il semble que la possibilité de percolation immédiate des précipitations dans les sables dunaires et la présence sous les dunes récentes de grès à ciment calcaire ou de vases anciennes pouvant jouer le rôle de niveau relativement imperméable isolant la nappe de la mer permettent une suralimentation locale de la nappe générale par les pluies. Cette hypothèse serait facilement vérifiable par quelques nivellements précis, qui montreraient peut-être une surélévation (de quelques décimètres) du niveau piézométrique de la nappe dans les dunes récentes par rapport au niveau dans les zones à l'amont.

Des modes d'exploitation originaux sont les trous creusés à la main dans les sables et rebouchés après puisage pour éviter la concentration de l'eau par évaporation (Anakao village par exemple) et les vovos de Kotoala, qui trouvent l'eau à un mètre de profondeur, dans les sables de la plage actuelle, à quelque 30 mètres de distance de la mer à marée moyenne. L'eau titre d'ailleurs plus de 5 g/l de chlorures.

REGION COMPRISE ENTRE SOALARA ET TSIVAHA. - La zone côtière quaternaire à l'Ouest de la falaise-faille du plateau Mahafaly (les recouvrements quaternaires sur le plateau lui-même n'ont aucun intérêt hydrogéologique, du fait de l'absence de substratum imperméable) comprend de nombreux points d'eau car, en dehors du glacis interne, il s'y trouve de multiples régions à basse altitude favorisant l'exploitation de la nappe littorale.

Au Nord de la dépression du lac Tsimanampetsotza qui, sous un faible recouvrement sableux, pourrait bien s'étendre d'ailleurs jusque près du couloir d'Itombona, les puits se trouvent principalement à proximité de la falaise calcaire dont la base est partout à moins de 25 m d'altitude. Les salinités sont comprises entre 2 et 4 g/l de NaCl. Dans le puits de la carrière de Soalara on a mesuré en Septembre 1957 un débit de 4950 l/h pour un rabattement de 1,72 m ; la courbe des débits (planche XVII) et la courbe limnigraphique indiquent qu'il y a une formation peu perméable (probablement des sables argileux) reposant sur un niveau beaucoup plus riche en eau, sans doute fissuré (grès quaternaires ou calcaires éocènes).

Au puits d'Antsirafaly, 3 kilomètres plus au Sud, le débit était à la même époque de 1200 l/h pour un rabattement de 1 m, dans une formation qui semble homogène.

Les puits et vovos d'Anakao sont dans les dunes récentes, entre la mer et une dépression salée. Nous avons fait mention ci-dessus du débit de 2900 l/h

pour un rabattement de 30 cm dans le puits Sud d'une eau à 0,70 g/l de chlorures et 30° DHT. Il faut dire que les autres points d'eau sont beaucoup plus salés (2 à 6,2 g/l suivant les points et les époques de prélèvement).

Dans la dépression du Tsimanampetsotsa, autour du lac, quelques vovos dans les vases donnent de faibles débits d'eau saumâtre, avec un minimum de 2,5 g/l à Bevovoka (du côté Est du Lac). Entre la dépression et la côte, tous les points d'eau montrent entre 3,2 et 7 g/l de chlorures, en moyenne 4,5 g/l ; cette forte minéralisation s'explique facilement si l'on admet que les vases de la dépression forment un barrage pour les eaux du réseau karstique de l'Eocène. La nappe littorale, faiblement alimentée et peu épaisse à l'Ouest du lac est donc fortement contaminée par l'eau de mer. Il existe en outre de nombreuses petites dépressions à sol salé.

Au Sud du Lac Tsimanampetsotsa on trouve plusieurs petits avens dans les grès à ciment calcaire, plus ou moins aménagés (Antanandranto, Vohombe) et une série de vovos dans la région d'Anjaha, creusés dans les grès calcaires et atteignant la nappe à moins de 3 m de profondeur. La moyenne des salinités dans cette région est de 3,5 g/l de NaCl, avec seulement 1,6 g/l à Antanandranto et 0,9 g/l dans le petit aven de Vatonatsifitsy, d'ailleurs inutilisé.

La région d'Itampolo est particulièrement riche en indices de circulations karstiques importantes : outre les résurgences en bord de mer, déjà décrites, on y trouve les avens de Nataiky, Vintany, Vondrona et la mare d'eau douce d'Itampolo, séparée de la mer par un mince cordon sableux, et qui semble bien être aussi un aven comblé. L'aven Vintany contient l'eau la plus douce de la région, avec 0,6 g/l de chlorures et 34° à 55° DHT ; l'eau est à 8 mètres sous le sol du côté Sud-Est de l'aven, avec un niveau très fixe.

Dès 1910, G.CARLE envisageait pour cet aven une résurgence des eaux de la Linta. Ce qui est certain, c'est que l'abondance de l'eau dans cette région est en relation avec une fissuration d'origine tectonique. On peut remarquer que c'est vers Itampolo que se rencontrent les failles majeures limitant le plateau Mahafaly, l'une, au Nord, de direction Nord 20° Ouest, l'autre au Sud de direction Nord-Ouest - Sud-Est. De plus, cette région s'aligne assez bien avec les avens aquifères d'Andramanoetse, sur le plateau et, beaucoup plus au Nord-Est, avec la région de Beomby-Lovo pour laquelle nous avons vu qu'il pouvait exister une structure synclinale. Comme pour la nappe suspendue de Beomby, mais beaucoup plus profondément et seulement à la faveur des joints de stratification dans les calcaires, il pourrait y avoir drainage préférentiel des eaux suivant cet axe, aboutissant à la zone fissurée d'Itampolo.

La région d'Elosy et Androka également riche en eau est, géographiquement, plus directement en relation avec la Linta, mais il faut remarquer que

celle-ci se perd dans l'Eocène quelque 60 kilomètres au Nord-Est et qu'une éventuelle correspondance est loin d'être prouvée. Les marais d'Elosy sont alimentés par la nappe et des vovos en bordure titrent 2,9 g/l de chlorures ; sauf à proximité de la lagune d'Androka, la teneur en NaCl est généralement inférieure à 2 g/l.

Un cas curieux est constitué par l'aven à parois en pente douce d'Andranobory, de 50 m de diamètre, où la hauteur d'eau atteint 21 mètres et qui, avant le cyclone de 1951, était inutilisable avec 53 g/l de chlorures ; à proximité immédiate, des puits donnaient une eau à 2,0 g/l en 1950. Après le cyclone, la salinité est passée à 1,3 g/l seulement et l'aven est devenu un point d'abreuvement très fréquenté. Il est probable que cette brusque déconcentration n'est pas due directement à l'apport d'eau douce par le cyclone, mais à l'ouverture à cette époque de nouvelles circulations karstiques (ou d'anciens chenaux colmatés).

Le puits de Saodona, dans les grès à ciment calcaire, sur la rive gauche de la Linta, atteint la nappe générale à 22 mètres de profondeur ; on a constaté des variations de niveau de 30 cm d'amplitude. En Juillet 1957, l'essai de pompage a donné un débit horaire de 1800 litres pour un rabattement de 0,43 m. L'eau est excellente avec 0,13 à 0,20 g/l de chlorures seulement et 29° à 37° DHT. Cette faible minéralisation et la position du puits n'impliquent pas forcément une influence de la Linta ; on peut simplement admettre pour le moment que les précipitations sur les alluvions sableuses du lit sont rapidement infiltrées et contribuent à diminuer la salinité de la nappe générale à proximité.

Entre la Linta et la Menarandra, la plupart des points d'eau, dans la dune récente ou dans les dépressions entre dunes (Maliolanitsy), sont faiblement minéralisés avec souvent moins de 0,5 g/l de chlorures. Certains vovos (Ankinana, Lohavoro, Ampalaza) exploitent la nappe dans des sables coquilliers très grossiers, non cimentés, correspondant à des formations littorales anciennes immédiatement sous la dune vive et l'eau est également peu salée (0,12 g/l et 45° à Lohavoro).

Par contre, les puits dans les grès à ciment calcaire et surtout les avens donnent des eaux saumâtres : 3,3 g/l de chlorures à Ankeheo, 5,3 g/l à Antaneotsy où l'eau est à 24 mètres sous le sol. Dans un autre ordre de potabilité, organique cette fois, l'aven d'Ankeheo, très fréquenté par les gens et les troupeaux, est le meilleur exemple de pollution, visible et odorante, que nous connaissions.

A l'Est de la Menarandra, dont la nappe alluviale alimente le puits de Mahatsandry, les points d'eau n'ont pas été visités depuis 1949, date de l'étude de R.PAVLOVSKY. La plupart sont dans des dépressions entre les dunes

et les salinités sont comprises entre 0,5 g/l et 5,2 g/l de chlorures. Le point d'eau le plus oriental de cette région est celui de Tsivaha, 17 kilomètres au Nord-Ouest de Lavanono.

REGION DE LAVANONO. - De Tsivaha à Ambatomitsotaka, sur 37 kilomètres, la plaine de Lavanono est entièrement dépourvue de points d'eau permanents. De Betendria aux affleurements du socle cristallin, les sondages ont montré que la nappe générale n'existe pas : au niveau de la mer et un peu au-dessus, où elle devrait normalement se trouver, les argiles et marnes attribuées au Néogène continental sont parfaitement imperméables.

Plusieurs hypothèses sont possibles quant au sort de la nappe générale, qui se trouve dans le Néogène à Beloha et Isampaiza, 25 kilomètres au Nord : ou bien elle reste dans le Néogène, mais dans ce cas on devrait trouver des sources dans la falaise du Sud du plateau Karimbola, à la partie supérieure du Néogène, à moins que la structure de celui-ci oblige la nappe à s'écouler latéralement dans le Néogène et le Quaternaire, vers la Menarandra d'une part, l'Est du Cap Sainte Marie d'autre part ; ou bien la nappe générale passe sous le Néogène continental, probablement dans les calcaires éocènes, où elle peut être captive, et n'a que des exutoires sous-marins.

Les conséquences pratiques sont importantes, puisque, dans le premier cas il n'y aurait aucun espoir de trouver de l'eau dans la plaine de Lavanono avec par contre la possibilité d'exploiter la nappe générale dans le Quaternaire du plateau Karimbola, au moins dans les points bas de son substratum ; dans le second cas, la nappe générale pourrait être recherchée dans l'Eocène, aussi bien sous le plateau Karimbola, mais à forte profondeur du fait de l'altitude du plateau, que dans la plaine de Lavanono et, si le Néogène imperméable se prolonge assez loin en mer, la nappe pourrait être à l'abri de la contamination par l'eau salée. On aurait alors un cas analogue à la nappe profonde du sondage d'Ankitry.

Signalons toutefois qu'un essai de puits en 1949, près de Lavanono et à 180 m de la mer a donné de l'eau à 18 g/l de chlorures. L'eau pourrait provenir d'infiltrations locales dans les formations de piedmont du glacier de Lavanono.

Au delà des affleurements du socle cristallin, où deux trous dans les gneiss sont utilisés comme citernes (ranovato de Fanolona), la nappe générale réapparaît dans les grès quaternaires et, à l'Est, en partie dans l'Eocène ; mais elle semble très faiblement alimentée, car l'eau est partout très saumâtre (Antaramaitsy, Ikatro, Ambatomitsotaka).

REGION COMPRISE ENTRE LE CAP SAINTE MARIE ET LE MANDRARE. - A l'Est du Cap Sainte Marie, il n'y a plus de plaine côtière et l'altitude des formations quaternaires s'élève, à peu de distance de la mer, à plus de 100 mètres. En même temps, les dunes actuelles sont peu développées. Tous les points d'eau se trouvent donc très près du rivage (toujours moins de 1 kilomètre et généralement moins de 300 mètres) et le plus souvent dans les grès à ciment calcaire, d'où des salinités généralement fortes et des débits très variables suivant les points.

Entre le Cap Sainte Marie et l'embouchure du Manambovo, les puits sont situés soit dans les petits ravins entaillant la falaise à l'Ouest de Katravitra, soit dans les dépressions entre dunes ou à l'arrière des dunes actuelles. La teneur en chlorures de l'eau varie de 0,55 g/l (un des puits d'Ijijika à 9 g/l (Salohy) en Mai 1958 et elle est en très nette augmentation par rapport à 1949, où R.PAVLOVSKY avait noté de 0,3 à 4,6 g/l. Des variations saisonnières du niveau statique pouvant atteindre 1 mètre d'amplitude sont signalées par les habitants et on peut penser que la salinité varie également avec les marées. De nombreux puits à 6 ou 8 g/l sont couramment utilisés, même pour l'alimentation humaine.

Les sondages dans cette région sont restés secs ou ont donné de l'eau trop salée. Dans le seul forage Sud-Anjaha, en Avril 1953, la nappe débitait 600 l/h d'une eau à 0,3 g/l de NaCl. En 1955, dès le premier épuisement dans le puits, la teneur était de 18 g/l. La nappe générale était nettement suralimentée en 1953 par des pluies cycloniques récentes (122 mm en Décembre 1952, 131mm et 107 mm en Février et Mars 1953 à la station pluviométrique de Faux-Cap), tandis que les années 1954 et 1955 ont été particulièrement sèches (200 à 300mm par an).

Du Manambovo au Mandrare, la plupart des vovos sont creusés dans les grès quaternaires, à la base de la falaise, immédiatement au Nord de la plage actuelle et trouvent la nappe à quelques mètres de profondeur, naturellement assez saumâtre, avec une teneur minimum de 6 g/l de chlorures.

Les prospections de H.BESAIRIE (1939) et R.PAVLOVSKY (1949) ont montré des dépressions dans les dunes ou immédiatement derrière les dunes actuelles, d'altitude inférieure à 30 mètres. Des puits ont été creusés, avec des résultats variables quant à la salinité, qui est toutefois plus faible que celle des vovos, et de bons résultats en ce qui concerne les débits, sauf à Kotoala. Les mesures suivantes ont été effectuées en 1957 et 1958 (voir planche XVII) :

Malaindoza Ouest	: 1090 l/h pour un rabattement de 0,72 m.
Malaindoza Est	: 2000 l/h " " " " 0,89 m.
Ionka	: 4500 l/h pour un rabattement stabilisé de 1,05 m.
Egaha	: 3789 l/h " " " " 0,47 m.
Tafian-Iankoba	: débit minimum de 1000 l/h (mesure RIGOT).
Sud-Ouest Elanja	: 1700 l/h pour un rabattement de 0,52 m.

Il y aurait cependant un inconvénient grave à extraire des débits trop importants de ces puits, car la salinité de l'eau ne pourrait qu'augmenter. C'est pourquoi, dans les puits équipés d'une pompe avec éolienne en 1958, le rabattement a été limité à 25 cm. La teneur en chlorures devra d'ailleurs être attentivement surveillée et le pompage arrêté en cas de dépassement des teneurs admissibles.

Nous n'avons pas connaissance dans cette zone de variations saisonnières importantes du niveau de la nappe, ni de grandes différences de salinités suivant les dates de prélèvement et il semble que la nappe littorale bénéficie ici d'une alimentation à la fois plus importante et plus régulière. Outre les pluies, plus fortes dans cette région (supérieures à 500 mm par an en moyenne), on peut penser que les nappes suspendues d'Ambondro et Ambovombe contribuent à régulariser l'alimentation, par leur déversement (de position inconnue d'ailleurs) dans les niveaux inférieurs du Quaternaire jusqu'à la nappe générale.

SONDAGES D'ANKITRY ET FERME AMBOVOMBE. - Ce sont les deux seuls points où l'on connaisse actuellement la nappe générale dans le Quaternaire, en dehors de la zone tout à fait littorale.

Ankity. - Dix kilomètres au Sud d'Ambondro, la nappe générale se trouve à Ankity entre 83 et 120 m de profondeur, soit entre les cotes +10 m et -27 m, d'abord dans des sables fins dunaires plus ou moins grésifiés jusqu'à 96 m, puis dans des sables grossiers littoraux attribués au Quaternaire ancien.

Dans les essais, seule la partie supérieure de la nappe a été testée, la base paraissant, d'après les salinités de la boue de forage, de minéralisation trop forte pour être utilisable. Dans l'essai de reconnaissance, avec pompe à 96 m, on a obtenu un débit de 1700 l/h, pour un rabattement inconnu ; dans le forage d'exploitation, après développement des sables grossiers par pistonage, un pompage de 4700 l/h n'a provoqué aucun rabattement du niveau de l'eau.

Bien que le sondage soit à plus de 7 kilomètres de la mer, la minéralisation est forte, avec, dans le forage de reconnaissance, 5,4 g/l de résidu sec dont 3,8 g/l de NaCl ; il est probable qu'une partie de cette minéralisation provient de la nappe générale elle-même et non uniquement des influences marines.

Ferme Ambovombe. - Trois kilomètres au Nord-Est d'Ambovombe, la nappe générale a été trouvée dans le forage Ferme Ambovombe à la profondeur de 120,75 m, soit à la cote +2,4 seulement, à 11 kilomètres de la mer, dans des sables dunaires quaternaires jusqu'à 142 m au moins, puis des formations littorales

sableuses et gréseuses jusqu'aux arènes au-dessus du socle cristallin (166 m, socle à 172 m).

Aucun essai de débit n'a été possible, par suite de l'ensablement du forage à chaque tentative. La perméabilité et la forte puissance de la nappe laissent présager d'excellents débits ; dans le forage rotary entrepris au fond du forage d'exploitation qui n'avait pu dépasser 140 m, une perte totale de la boue d'injection s'est produite entre 140 m (base du tubage) et 142,70 m.

On peut remarquer qu'après diverses opérations dans le trou, dont le dynamitage des tubages provisoires coïncés, le niveau piézométrique de la nappe était à 116,3 m en Août 1958, soit à l'altitude +6,8 m, 4,4 m au-dessus de son niveau de Juillet 1957. Le fait est difficilement interprétable.

En ce qui concerne les salinités, un prélèvement au sommet de la nappe en Juillet 1957 a donné 1,85 g/l de chlorures et 45° hydrotimétriques et un prélèvement moyen, en Août 1957, lorsque le forage était à 140 m, a donné 3,30 g/l et 113° DHT. En Juillet 1958, après une longue interruption des travaux, l'eau titrait : en surface de la nappe 1,76 g/l de chlorures et, pour un prélèvement moyen, 1,97 g/l. Il y a donc tout lieu de penser que l'eau est utilisable, au moins dans la portion de nappe comprise entre 120 et 142 m, qui est aussi la zone de meilleure perméabilité des terrains.

NAPPES ALLUVIALES DES FLEUVES

Les nappes alluviales, en correspondance avec la nappe générale, constituent des annexes de celle-ci. Leur importance est considérable du point de vue pratique, tant en ce qui concerne l'alimentation en eau que les possibilités agricoles (mais ce dernier point est, jusqu'ici, assez négligé). Le comportement des nappes dépend essentiellement de l'alimentation, du profil en long des fleuves et de la nature du substratum des alluvions. Les profils topographiques et géologiques ont été figurés planche X.

ONILAHY. - L'écoulement de surface est permanent dans l'Onilahy et sa nappe alluviale est, par conséquent, peu exploitée. Elle est d'ailleurs limitée aux poches alluviales dans les coudes du fleuve. La puissance des alluvions n'est connue, dans le lit mineur, qu'à Tongobory, où des sondages ont traversé 7 à 8 m de sables moyens, puis 6 à 7 m de sable grossier à galets, de calcaire et de grès, soit au total 14 m d'alluvions. Il est probable que la puissance des alluvions est beaucoup plus grande vers l'embouchure.

Des mesures effectuées par J. BOULANGER (1955) sur l'eau du fleuve en Septembre 1955 montrent que la teneur en chlorures est de l'ordre de 35 à 45 mg/l et que l'influence des eaux marines ne se fait sentir, à marée basse, que sur 3,5 kilomètres en amont de la pointe de Tambohoabo.

L'eau des vovos étudiés dans la nappe alluviale, rive gauche, à moins de 2 mètres sous le sol, a des teneurs de 0,06 g/l de NaCl et 15° DHT (Amararata) à 0,15 g/l et 32° (Bereoky).

Il est certain que, au moins à partir de l'entrée dans les calcaires éocènes, des pertes importantes se produisent, sous les alluvions, au profit du réseau karstique général. Sur la rive droite, H.BESAIRIE (1929) signale des pertes dans des fissures du calcaire près de Maroamalona, à 20 kilomètres de l'embouchure ; il est probable qu'une étude détaillée en révélerait d'autres.

Nous avons vu, à propos de la nappe générale dans l'Eocène, que ces infiltrations pouvaient contribuer à abaisser la salinité de l'eau de la nappe générale, en particulier pour les sources de la région d'Ambolonaondry.

LINTA. - L'écoulement dans la Linta est temporaire jusqu'au confluent de la Manakaralahy et tout à fait exceptionnel au delà, où il ne peut y avoir un débit de surface que lors des très fortes pluies, et pendant quelques heures seulement. Ces crues ont d'ailleurs causé des dégâts considérables et une modification brusque de la topographie de l'estuaire en 1951.

Le sous-écoulement est permanent dans les alluvions du lit mineur, et il est probable qu'il existe également de l'eau dans les alluvions des berges, jusqu'à Ankazontaha, 5 kilomètres en aval du confluent de la Manakaralahy. Les salinités relevées à la même époque (Mai 1956) à Ejeda, Mitsoriaka, Matavy et Ankazontaha sont tout à fait comparables à celles des petits thalwegs sableux dans le socle cristallin avec 0,05 à 0,10 g/l de chlorures et 11° à 19° hydro-tyométriques, sans variation systématique de l'amont vers l'aval.

Après la traversée des calcaires gréseux du Crétacé supérieur, écoulement et sous-écoulement disparaissent à peu près totalement dans les alluvions, dont on ne connaît ni l'épaisseur ni le substratum exact ; J.ARCHAMBAULT (1957) a observé la perte le 9 Octobre 1956 : le débit, d'environ 100 l/sec en surface au gué d'Ankazontaha, diminue progressivement entre le gué et un point situé 1,2 km à l'aval, les cent derniers mètres absorbant environ 20 l/sec. Il y aurait une variation de 200 mètres du point terminal d'infiltration au cours de la journée, sans doute par effet de l'évaporation.

Au delà vers l'aval, on ne connaît plus de sous-écoulement. Tout à fait localement et lorsque les alluvions contiennent des niveaux argileux, il peut se former des petites nappes temporaires, comme celle qui est exploitée à Etenetsa, 12 kilomètres en aval des pertes, et qui est habituellement tarie fin Juin, alimentées par les crues ; on a vu précédemment que le vovo de Bealatsy avait une origine très différente (source dans les calcaires).

La nappe alluviale ne réapparaît qu'à proximité immédiate de l'estuaire, près d'Androka, où elle se confond avec la nappe littorale, sauf par sa minéralisation, très faible : 0,10 g/l de chlorures et 12° DHT dans un des vovos de Saka-Androka.

Il ne fait, pour nous, aucun doute que la disparition des eaux de la nappe alluviale est liée à l'enfoncement du socle cristallin, qui la soutient directement (et l'alimente) jusqu'à la Manakaralahy, est à faible profondeur sous le Crétacé (relativement imperméable mais où doivent déjà se produire des pertes) jusqu'à Ankazontaha et peut s'abaisser brutalement au delà⁽¹⁾. De toutes manières, la perte se produit dès l'entrée dans les calcaires éocènes, et les eaux rejoignent vraisemblablement très rapidement le réseau karstique général, à faible pente hydraulique, car nous ne connaissons dans cette région et en amont des pertes (c'est-à-dire stratigraphiquement au-dessous) aucun niveau assez imperméable pour soutenir ce qui serait une "Linta souterraine".

La profondeur des recherches de la nappe générale dans la vallée de la Linta, topographiquement favorable, est donc presque uniquement fonction de l'altitude du sol. Le nivellement barométrique précis effectué en 1957, qui a servi à établir le profil de la planche X, permet une meilleure estimation des profondeurs possibles.

MENARANDRA. - L'écoulement dans la Menarandra est permanent jusqu'au confluent avec la Sakatovo, en aval des chutes de Riambe. Le sous-écoulement dans le lit mineur est permanent pratiquement jusqu'à la mer et il existe une importante nappe dans les alluvions anciennes jusqu'aux gorges d'Erea. Le Néogène continental, relativement imperméable, intercalé entre les alluvions et l'Éocène, forme le substratum de la nappe qui est en équilibre avec la nappe générale.

Les puits d'Ampotaka, Analafaly et Marolinta atteignent la nappe respectivement à 8, 5 et 4 m dans les alluvions anciennes ; d'autres puits dans la terrasse récente trouvent l'eau vers 1,50 à Marolinta. La salinité dans ces derniers puits, très utilisés, est faible : 0,06 à 0,08 g/l de NaCl et 30° DHT tandis que, dans les alluvions anciennes, les puits, moins exploités d'ailleurs, ont de 0,24 à 0,82 g/l de chlorures et 28° à 48° DHT.

Les débits mesurés à Analafaly et Marolinta sont très comparables (voir planche XVII) avec respectivement 4500 l/h pour un rabattement de 0,49 m et 4300 l/h pour un rabattement de 0,52 m. Il n'est pas douteux que des puits profonds exploitant toute la hauteur de la nappe alluviale (les puits essayés avaient environ 0,75 d'eau) permettraient d'extraire des quantités d'eau susceptibles d'irriguer de petites surfaces.

(1) Il peut y avoir un talus précambrien, mais la faille figurée dans le Crétacé sur la planche X résulte d'une erreur de dessin.

La nappe alluviale, qui apparaît encore dans le sous-écoulement du petit thalweg Ankily, 5 kilomètres en amont des gorges d'Erea, ne se trouve plus que dans le lit mineur ensuite. La traversée, très courte, des calcaires éocènes, qui sont ici les calcaires à Huftres, beaucoup moins fissurés que les niveaux inférieurs, ne paraît pas marquée par des pertes importantes et la nappe alluviale rejoint normalement la nappe côtière.

Près de l'embouchure du fleuve, dans un bras mort, le puits de Mahatsandry fournit l'eau la meilleure de la région, avec 0,05 g/l de NaCl et 190 DHT et des émergences de la nappe apparaissent à 1500 m de la mer, à Kobokara, où l'eau titre encore moins de 0,3 g/l de chlorures.

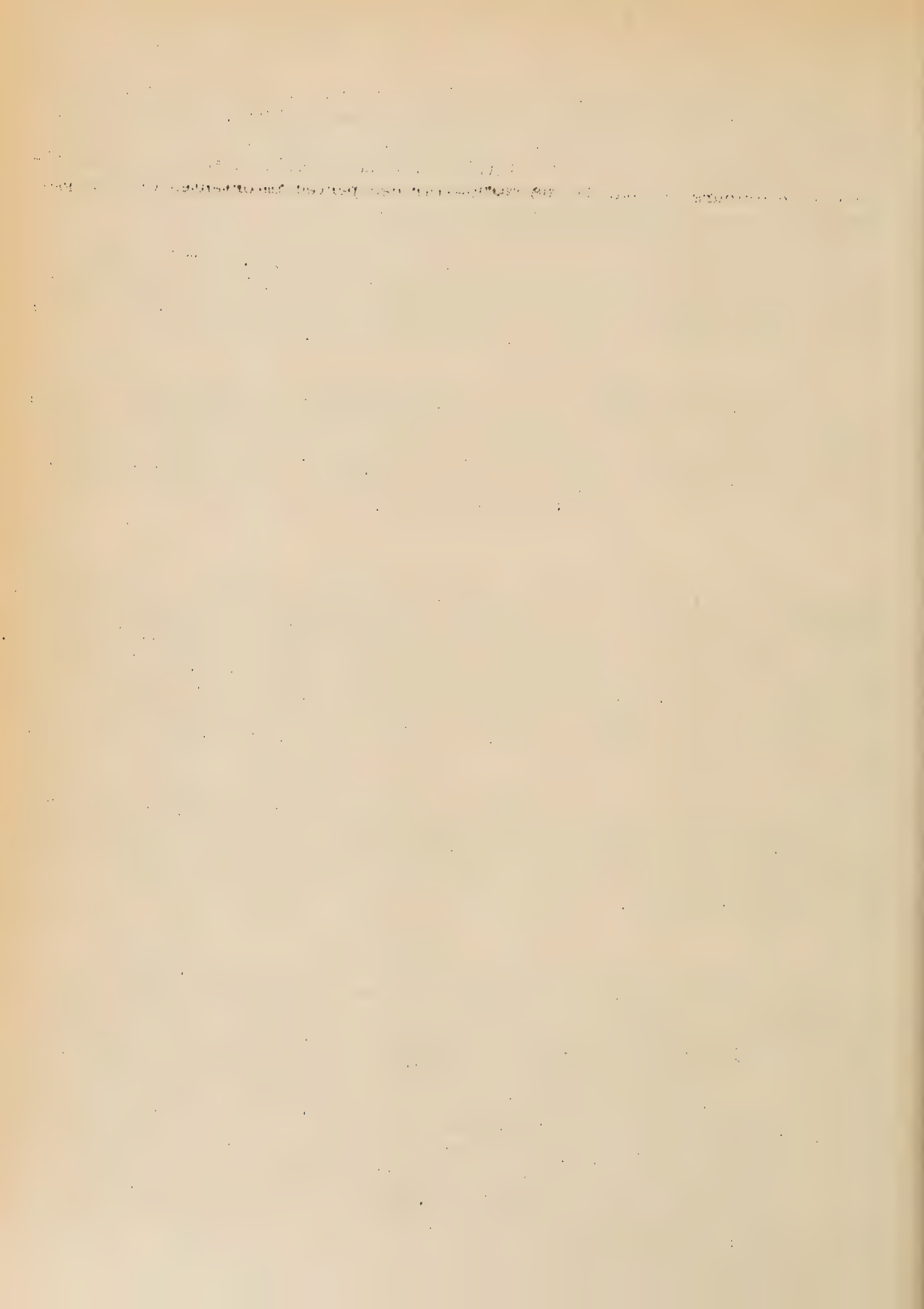
En résumé, la nappe alluviale de la Menarandra pourrait fournir des quantités d'eau importantes et modifier largement l'économie actuelle du pays. La nappe est bien alimentée, les formations qui la contiennent sont largement perméables et les sols sont favorables aux cultures. Le fait est connu depuis longtemps d'ailleurs et H.BESAIRIE a montré d'autre part les possibilités d'irrigation de la plaine alluviale par barrages.

MANAMBOVO. - Les alluvions sont beaucoup moins développées le long du Manambovo, dont la majeure partie du cours se trouve dans la zone d'affleurement du socle précambrien. La limite d'écoulement est extrêmement variable suivant les années, mais il existe toujours un sous-écoulement dans le lit mineur, à très faible profondeur, jusqu'à l'embouchure ; le profil en long, quasi rectiligne dans la zone du socle est exactement parallèle à la pente de la nappe générale. Les eaux ont la salinité normale à celles du socle cristallin dans les sous-écoulements des thalwegs.

L'entrée dans les formations quaternaires vers le confluent de la Sakamasy n'est marquée par aucune perte visible du sous-écoulement ; le fleuve est assez fortement encaissé et seules les émergences de la nappe dans le lit mineur sont exploitées.

MANDRARE. - Le Mandrare est un fleuve pérenne, ne tarissant qu'en année exceptionnellement sèche dans la zone aval, avec un sous-écoulement toujours très important. La nappe alluviale est bien développée, soutenue partout par les formations volcaniques du Massif de l'Androy et par le socle précambrien.

Il n'y a pas lieu de s'étendre sur les caractères de cette nappe, qui n'a d'ailleurs pas été étudiée en détail et qui n'est guère utilisée que par les exploitations de sisal. H.BESAIRIE signale toutefois que, dans les alluvions anciennes, les eaux peuvent être parfois fortement minéralisées : à Amboasary un puits a rencontré une eau inutilisable, avec 2,84 g/l de chlore, 5,68 g/l de sulfates et plus de 19 g/l de résidu sec, alors que les eaux du fleuve et de son sous-écoulement sont douces.



CONCLUSIONS

=====

Dépassant le but initial, essentiellement analytique, de nos recherches hydrogéologiques dans le Sud de Madagascar (inventaire des points d'eau), nous avons cherché à répondre à une double question, d'apparence simple : Pourquoi y a-t-il là une nappe aquifère, et pourquoi non ailleurs ? Si dans bien des cas la réponse est évidente, elle l'est parfois moins et la question pose alors une série de problèmes enchaînés, auxquels nous avons fait une large place dans l'étude des systèmes aquifères ; nous avons vu que bien des données manquent encore pour leur donner des solutions satisfaisantes.

En règle générale, la réponse est d'abord d'ordre géologique et c'est une des raisons qui a fait placer en tête de ce mémoire un exposé de ce que l'on connaît actuellement sur la constitution géologique de la région, évitant ainsi par ailleurs les redites. Le deuxième point essentiel est celui de l'alimentation des nappes, dont nous avons examiné les facteurs principaux, concluant à la possibilité quasi générale d'un apport d'eau suffisant par les précipitations, malgré une évapotranspiration potentielle très élevée.

La description des systèmes aquifères, suivant un ordre géologique et régional, en considérant en premier lieu les nappes localisées, puis la nappe générale, commune à plusieurs niveaux, comporte l'essentiel des données acquises fin 1958, dans la mesure où elles peuvent avoir un intérêt scientifique et servir à une meilleure compréhension des problèmes hydrogéologiques.

Après cette énumération, forcément touffue, de données, hypothèses, résultats, il n'est sans doute pas inutile de regrouper les nappes aquifères suivant un ordre logique, de rappeler les principales données et hypothèses nouvelles et de mettre en relief les lacunes, nombreuses et parfois graves, de

nos connaissances, en indiquant pour terminer les méthodes de travail qui nous paraissent les plus propres à une solution rationnelle du problème de l'eau dans ces régions.

ESSAI DE CLASSIFICATION DES NAPPES

Ce sont en fait les réponses à la double question évoquée plus haut, c'est-à-dire les conditions d'existence des nappes, qui nous serviront de base pour un essai de classification des systèmes aquifères, applicable à la seule région considérée, et en ne tenant pas compte d'ailleurs des nappes très locales ou trop mal connues, auxquelles il est impossible, pour le moment, d'attribuer une place de façon précise.

Au premier rang des critères de classification viennent les principaux types de pièges aquifères, définis théoriquement au début du chapitre Hydrogéologie. Le second critère est le mode d'alimentation prédominant ; il y a là, naturellement, faute de données numériques, une certaine part d'appréciation personnelle. A l'intérieur de chacun des grands groupes ainsi formés, des distinctions sont possibles par les caractères secondaires ou accessoires des pièges aquifères d'abord, de l'alimentation des nappes ensuite.

Pour alléger le tableau suivant, on a employé des formules abrégées qu'il est nécessaire de préciser :

- Piège lithologique simple : Piège aquifère constitué par la superposition d'un niveau perméable et d'une couche imperméable tabulaire, horizontale ou faiblement inclinée.
- Piège littoral : Piège aquifère dont le réservoir est partiellement rempli par l'eau de mer, qui forme un mur relativement imperméable pour l'eau douce.
- Piège tectonique : piège aquifère structural d'origine tectonique, où la déformation du mur est postérieure au dépôt des roches formant le réservoir.
- Piège morphologique : piège aquifère structural où la déformation du mur est antérieure au dépôt des roches formant le réservoir.
- Nappe suspendue : nappe dont le mur est interrompu vers l'aval.
- Nappe captive : nappe dont le réservoir est limité vers l'aval.
- Précipitations : alimentation directe par les précipitations et par un ruissellement local, sur le réservoir de la nappe.
- Ruissellement : Alimentation par des eaux superficielles issues d'autres formations que celles contenant la nappe.
- Drainage : Alimentation par passage latéral souterrain de l'eau d'une formation dans une autre.
- Déversement : Alimentation par déversement souterrain d'une nappe supérieure suspendue.

Classification

Piège lithologique simple

Précipitations prépondérantes

Nappes suspendues

Précipitations seules : Nappes phréatiques dans l'Isalo.

Drainage possible : Nappe d'Ankazomanga.

Ruissellement temporaire : Nappe d'Ambovombe.

Nappes captives

Déversement : Nappes profondes dans l'Isalo, le Jurassique et le Crétacé.

Drainage prépondérant

Nappe captive

Drainage seul : Nappe profonde d'Ankitry.

Déversement prépondérant

Nappe suspendue

Précipitations : Partie Sud de la nappe d'Ambovombe.

Piège littoral

Précipitations prépondérantes

Perméabilité par fissures

Déversement + ruissellement + drainage : Nappe générale dans l'Eocène, région Nord-Ouest.

Drainage prépondérant

Perméabilité par fissures

Précipitations + drainage + ruissellement : Nappe générale dans l'Eocène, région Sud.

Perméabilité d'interstices et fissures

Drainage seul : Nappe générale dans le Quaternaire, région Ouest.

Précipitations et déversement : Nappe générale dans le Quaternaire, région Sud et Est.

Piège tectonique

Précipitations prépondérantes

Structure synclinale

Précipitations seules : Nappe de Beomby-Lovo

Drainage prépondérant

Fissuration d'origine tectonique

Drainage seul : Nappe générale dans le Quaternaire, région d'Itampolo.

Piège morphologique

Précipitations prépondérantes

Piège local

Précipitations seules : Nappe de Tsimandaha

Nappes d'Ambondro

Ruissellement + drainage : Nappe de Beloha

Nappe d'Itrobeta

Piège général discontinu

Précipitations seules : Nappe générale de la zone d'affleurement du socle.

Drainage prépondérant

Piège local

Ruissellement + précipitations : Tous les sous-écoulements de la zone du socle

Nappe alluviale de la basse Menarandra

Nappe alluviale du bas Manambovo

Piège général discontinu

Précipitations : Nappe générale dans le Néogène continental.

Déversement : Nappe générale du socle altéré en dehors de la zone d'affleurement

Ruissellement prépondérant

Piège local

Drainage et précipitations : Nappe alluviale du Mandrare.

Drainage : Nappe alluviale de l'Onilahy.

DONNEES ET HYPOTHESES NOUVELLES

Les résultats des recherches récentes avaient été signalés au fur et à mesure dans nos travaux antérieurs ; on a essayé de les regrouper ici, en les résumant, dans un même document, et en les joignant aux données anciennes. Ce travail serait donc une simple compilation, rendue nécessaire d'ailleurs par la dispersion et le volume de la documentation archivée depuis 30 ans, si l'on n'avait pas cherché à interpréter les faits ainsi rassemblés, de façon hasardeuse parfois, discutable souvent, mais, croyons-nous, utile.

Un des progrès récents est une meilleure connaissance des débits des points d'eau. En 1957 et 1958, tous les puits accessibles au matériel de pompage employé et présentant une hauteur d'eau suffisante ont été essayés (sauf dans les zones très exploitées où des puits-témoins ont été choisis). Les résultats sont cités dans le texte et schématisés par les courbes de débit, planche XVII.

Une première constatation s'impose : les débits sont partout faibles ou très faibles, en raison de la nature des nappes et de la pauvreté générale de l'alimentation. Sauf dans les régions Nord-Ouest, où les nappes profondes pourraient fournir (et fournissent à Bezaha) de gros débits, il n'y a aucun espoir de trouver des quantités d'eau suffisantes pour l'irrigation de vastes surfaces et l'économie du pays ne pourra en aucun cas être largement modifiée par l'exploitation des eaux souterraines.

Un fait intéressant, d'ailleurs normal, est l'allure analogue des courbes de débit pour les points d'eau d'une même nappe, ce qui permet maintenant d'apprécier quel pourra être le débit d'un puits que l'on se propose de foncer, et la variation des débits en fonction directe des variations du niveau piézométrique, d'où la possibilité d'estimer le débit d'un puits, sans essai, à toute époque de l'année.

Les données sont toutefois encore très insuffisantes pour tenter d'établir le bilan des nappes et il y a encore beaucoup à faire sur ce point.

La reconnaissance de la nappe générale, atteinte par sondages dans les zones internes du sédimentaire en 1952-53 puis 1955 ne s'est guère complétée que dans le bassin d'Ambovombe, ce qui a permis de préciser dans cette zone la topographie profonde du toit du socle cristallin (planche II) et la forme de la surface piézométrique de la nappe (planche VIII). Il reste beaucoup d'inconnues, en particulier en ce qui concerne le passage de la nappe du Néogène continental au Quaternaire dunaire. Dans les autres régions, les courbes isopiézométriques de notre carte hydrogéologique de 1957 n'ont été modifiées que par analogie avec le bassin d'Ambovombe et d'importants travaux sont, là aussi, nécessaires.

En ce qui concerne les nappes locales, des études de détail à Betioky, Beomby, Beloha, Ambovombe précisent la forme des nappes et les ressources exploitables. Le tarissement de la nappe de Betioky a été mis en évidence et une hypothèse nouvelle est proposée pour la nappe d'Ambovombe, qui pourrait être une double nappe suspendue.

Du point de vue purement géologique, que nous considérons comme primordial, les travaux hydrogéologiques urgents et indispensables ne nous ont pas souvent permis d'effectuer les levés détaillés nécessaires. En complétant les observations de terrain par l'examen des photographies aériennes, il a cependant été possible de donner une nouvelle carte au 1/200.000 d'une grande partie du plateau calcaire Mahafaly et de ses abords, à corriger ultérieurement, et des contours plus précis des formations sédimentaires dans la partie Sud de la zone étudiée (planche IV).

En ce qui concerne la stratigraphie, la position des formations continentales du bassin d'Ampanihy au-dessus des calcaires éocènes le long de la falaise orientale a été reconnue de façon indubitable. La récolte de microfaunes, malheureusement insuffisantes, suggère la possibilité d'existence de Miocène marin au sommet du plateau, les marnes à Ostrea pelecycdion pouvant être oligocènes et en légère discordance sur le Lutétien.

Des levés détaillés sont encore nécessaires pour vérifier l'hypothèse du synclinal de Beomby, qui aurait une grande importance hydrogéologique, dans le plateau Mahafaly, dont la reconnaissance structurale pose un gros problème topographique.

Les sondages dans le bassin d'Ambovombe ont montré la grande extension vers le Nord des formations dunaires anciennes. La présence de formations littorales anciennes dans les sondages d'Ankitry et Ferme Ambovombe prouve que la forme de la côte actuelle est relativement récente. Les dépôts lagunaires ou marins de la base de la série à Ankitry posent un problème géologique et hydrogéologique d'une grande importance.

PROBLEMES MAJEURS A ETUDIER

La question de la composition chimique des eaux souterraines n'a été qu'à peine évoquée, et il y a là certainement une des lacunes majeures de notre travail ; il est très probable qu'une étude géochimique permettrait de résoudre, ou au moins d'éclaircir, des problèmes essentiels, tels que l'origine des minéralisations, anormalement fortes presque partout, l'alimentation des nappes, leur écoulement. Nous n'avons pu entreprendre ce travail, qui exige tout d'abord le dépouillement des analyses anciennes, parfois fort incomplètes et de valeur inégale, puis la multiplication des prélèvements et des analyses.

On a vu que les eaux du Sud de Madagascar, y compris celles des nappes du socle cristallin, présentent des teneurs en chlorures souvent élevées, dont l'origine est très discutée. C'est d'ailleurs là un fait commun à la plupart des régions arides, qui, à notre connaissance, n'a pas reçu d'explication entièrement satisfaisante. Il faudrait pouvoir rendre compte à la fois de l'origine des concentrations, des variations dans le temps et des variations dans l'espace, qui sont particulièrement accentuées dans le cas de la nappe générale du Néogène continental.

Nous savons que les minéraux ferro-magnésiens renferment une proportion non négligeable de chlore (de 200 à 600 mg par kilogramme) et que toutes les roches, y compris les roches éruptives, en contiennent des teneurs de l'ordre de 150 mg/kg. L'eau de pluie, en particulier près des côtes, est également chlorurée. Les autres éléments existent un peu partout en quantité suffisante ; encore faudrait-il expliquer leur mise en solution dès le socle cristallin.

La concentration, irrégulière, ne peut pas être mise entièrement sur le compte de l'évaporation qui est sensiblement la même partout ; il y a certainement intervention d'un facteur régional variable, que l'on ne peut guère trouver que dans les formations géologiques contenant les nappes, effectivement très hétérogènes. La région la plus caractéristique, à étudier en premier lieu, est celle de Tsihombe et de la nappe de Ihodo.

Le déséquilibre du rapport chlore sur alcalins, caractéristique des nappes du socle cristallin, se remarque dans les quelques analyses examinées et n'existe plus dans les eaux du Néogène et de la nappe littorale. La présence, signalée par De ROBILLARD, de nitrates en quantités trop fortes pour pouvoir être attribuées uniquement à une origine organique est un problème annexe qui devrait trouver sa solution dans une étude géochimique générale.

La solution du problème de l'alimentation des nappes exigera certainement une longue période d'observations et d'expériences, dont la nécessité n'a pas, jusqu'ici, été bien comprise. On a vu que, dans la plupart des cas, on ne connaît les variations saisonnières des nappes que par des renseignements très imprécis. L'organisation, réclamée depuis longtemps par les hydrogéologues, d'un relevé régulier (il pourrait même être continu et automatique) des niveaux piézométriques des nappes est indispensables si l'on veut, comme le cas s'est présenté récemment à Ambovombe, estimer les réserves minima des nappes à l'étiage.

Les renseignements climatiques sont assez complets en ce qui concerne la pluviométrie dans les stations établies depuis longtemps, mais les extrapolations sont très hasardeuses dans cette région, où les pluies sont très locales, et l'établissement de nouvelles stations s'impose, en particulier sur le plateau Mahafaly (nous pensons en particulier aux régions d'Ankazomanga et de Beomby).

Les autres facteurs contrôlant l'évapotranspiration sont pratiquement indéterminés partout. Il est pour nous certain d'ailleurs que des expériences prolongées seront de plus de valeur que les tentatives de mise en équation du phénomène, jusqu'ici plutôt paradoxales dans leurs conclusions. Des mesures de porosité et perméabilité au laboratoire donneraient déjà d'utiles renseignements sur les possibilités de percolation des eaux de pluie, permettant de délimiter les zones à étudier sur place, soit à l'aide d'infiltromètres portatifs, soit par des installations fixes, pas obligatoirement très coûteuses, étudiant le comportement des précipitations réelles.

Un point à étudier également est celui des relations entre les nappes et les données hydrologiques sur l'écoulement des cours d'eau.

Au cours de l'étude des systèmes aquifères, la même question s'est posée à propos de presque toutes les nappes locales, et n'a reçu en réponse que des hypothèses : c'est celle de l'extension des nappes, dont la solution est d'ordre purement géologique. C'est en particulier à l'aval des nappes suspendues que la délimitation des nappes est intéressante ; les études de débit montrent, sans qu'il s'agisse d'un fait fortuit (réalisé pour les nappes d'Itrobeka, Beloha, Ampanihy, Ambovombe), bien que non expliqué,

qu'il y a augmentation des débits dans ce sens. Il est certain, en tous cas, que des quantités d'eau appréciables disparaissent par déversement dans les nappes profondes, alors qu'elles seraient utilisables de façon économique si l'extension des nappes vers l'aval était déterminée par des sondages de reconnaissance. L'extension actuellement connue est très généralement celle de la zone d'exploitation, où les puits ne dépassent le plus souvent pas 20 mètres ; une profondeur double de la nappe ne serait certainement pas prohibitive.

Enfin, en dehors des nappes actuellement exploitées, il existe vraisemblablement d'autres nappes inconnues à rechercher ; nous avons cité la probabilité très grande de nappes profondes dans l'Isalo, le Jurassique et le Crétacé dans la région Nord-Ouest, qui pourraient fournir des débits artésiens considérables, la nappe possible sous le Néogène de la côte Sud, qui est le seul espoir d'alimenter en eau une vaste région, la nappe profonde d'Ankitry, qui pourrait pallier l'insuffisance de la nappe littorale dans une partie du bassin d'Ambovombe. Si les formations lacustres de la cuvette d'Ampamolora-Ambovombe ont, comme il est probable, une extension plus grande que celle de la dépression actuelle, il existe aussi des possibilités de nappes suspendues, analogues à celle d'Ambovombe, sous les plateaux d'Ambondro et de Beanantara.

On voit que les sujets de recherches ne manquent pas (et nous n'avons cité que les principaux) et que l'étude hydrogéologique du Sud de Madagascar, tant théorique que pratique, est très loin d'être terminée.

METHODE ET TECHNIQUES DE TRAVAIL

Nous ne pouvons mieux faire que de reprendre les termes de J. ARCHAMBAULT (Hydrogéologie tunisienne, 1947), avec qui nous sommes parfaitement d'accord sur ce point, lorsqu'il déclare que "les techniques propres à la recherche des hydrocarbures sont pleinement applicables à l'hydrogéologie et (que) celle-ci a tout à gagner à la mise en oeuvre de méthodes de travail longuement éprouvées et qui se sont révélées comme parfaitement adaptées au but poursuivi".

La valeur de l'eau est cependant inférieure à celle du pétrole, ce qui ne permet pas, malheureusement, d'employer à sa recherche les multiples moyens techniques disponibles, trop coûteux ; il est donc nécessaire de faire un choix parmi ces moyens et de les utiliser à bon escient.

Les techniques de terrain, comprenant les levés purement géologiques, les opérations topographiques (nivellement principalement), l'observa-

tion des points d'eau et de leurs débits, sont susceptibles de fournir à elles seules les réponses à de nombreuses questions locales. Elles devraient normalement et systématiquement être complétées par des sondages peu profonds, de pure reconnaissance (équivalents des "coredrills" des recherches pétrolières), d'autant plus nécessaires dans le Sud de Madagascar que les affleurements du sous-sol y sont rares. La structure de plusieurs pièges aquifères pourrait ainsi être déterminée facilement.

Les prospections géophysiques sont particulièrement utiles pour la recherche des niveaux profonds, où il est impossible de multiplier les forages de reconnaissance. Les études par sondages électriques qui ont débuté en Novembre 1958 dans plusieurs zones, donneront certainement des résultats importants, à confronter avec les hypothèses géologiques ; ce sont les seules qui puissent délimiter les zones inexploitable des nappes trop minéralisées. Il sera sans doute nécessaire de les compléter par des prospections sismiques, pratiquement seules utilisables dans le cas de séries sédimentaires épaisses et variées (région Nord-Ouest).

Pour tous les sondages de recherche d'eau, nous considérons comme absolue la nécessité d'un contrôle géologique permanent. Plusieurs exemples d'erreurs ou de lacunes résultant de la non-observation de cette règle ont été donnés ; il serait trop facile de les multiplier. Ceci exige malheureusement un personnel en nombre suffisant, sous peine de voir négligées, une fois de plus, les études générales.

Le forage rotary est certainement le plus économique, parce que le plus rapide, mais l'établissement des logs présente de grandes difficultés lorsque l'on ne dispose que des "cuttings". On ne peut que souhaiter l'introduction à Madagascar de techniques élémentaires, telles que l'enregistrement de l'avancement et surtout le carottage électrique, qui permettrait de déterminer très précisément les niveaux aquifères.

Il est inutile d'insister ici sur l'importance des travaux de laboratoire (déterminations, perméabilités, analyses), de cartographie, de mise à jour et de classement des données, toutes opérations qui, si elles n'offrent pas en général de grandes difficultés, demandent un temps considérable.

Enfin, comme en toute matière scientifique, la comparaison des problèmes locaux avec les problèmes analogues se posant dans d'autres régions, où ils peuvent avoir déjà été résolus ne peut être que profitable. Le fait qu'une telle comparaison ne figure pas dans ce mémoire est une autre lacune majeure de notre travail.

La lecture de ce mémoire aura montré l'abondance des points d'interrogation et des conditionnels, aussi bien à propos de petits problèmes locaux que pour des questions générales. C'était notre principal but de regrouper ces problèmes et, quelque insuffisantes qu'en soient actuellement les données, d'en discuter les solutions possibles.

Nous serions heureux si ce travail pouvait servir à souligner la nécessité d'effectuer certaines études d'apparence théorique, parfois fort longues, avant d'espérer résoudre convenablement les problèmes pratiques de l'alimentation en eau dans le Sud de Madagascar. La rareté même de l'eau dans cette région justifie la difficile recherche de solutions rationnelles, permettant d'utiliser au mieux les faibles ressources disponibles.

BIBLIOGRAPHIE

arrêtée au 31 décembre 1958

La liste donnée ci-dessous comprend les documents qui ont trait, en tout ou en partie, à l'hydrogéologie dans la région considérée, à l'exclusion des études uniquement géologiques. Elle comporte des ouvrages imprimés (notés I), des publications, en général ronéotypées, à diffusion limitée à quelques bibliothèques (R) et des documents inédits ne pouvant être consultés qu'au Service géologique de Madagascar à Tananarive et dans diverses archives administratives (A). Certains d'entre eux, indiqués entre parenthèses, n'ont pu être consultés directement. Les ouvrages importants sont marqués d'un astérisque (*).

Abréviations :

- ASG : Archives du Service géologique de Madagascar. Tananarive.
TBG : Travaux du Bureau géologique. Tananarive.
DBG : Documentation du Bureau géologique. Tananarive.
ADGTP : Archives de la Direction générale des Travaux publics. Tananarive.
-

- (A) ANONYME, 1944.- Chemin de fer Sakoa-Mozambique. Sondages de recherches pour l'eau. ASG. A.201, 1 pl.
- (A) - 1949.- Chemin de fer Sakoa-Mozambique. Recherches sur l'alimentation en eau des gares. ASG. A.804, 17 p., 10 pl.
- (R)*ARCHAMBAULT J., 1956.- Données pour l'équipement d'hydraulique pastorale de l'extrême Sud de Madagascar. Inspection générale de l'Elevage et des Industries animales de Madagascar. BURGEAP (et ASG. A.984), 53 p., 6 pl.

- (R)*ARCHAMBAULT J., 1957.- Etude d'hydraulique pastorale dans le Sud de Madagascar (2^{ème} mission). Inspection générale de l'Elevage de Madagascar. BURGEAP. 26 p., 5 pl.
- (A) (AUBERT A., 1948).- Sur un programme d'hydraulique humaine et pastorale dans l'Androy. Rapport préliminaire. ADGTP.
- (R) AUROUZE J., 1955.- Deuxième campagne de recherche d'eau dans le Sud de Madagascar. Rapport annuel Serv.Géol.de Madagascar pour 1955. p.109-113, 2 pl.
- (A) - 1956 (a).- Rapport sur un programme d'hydraulique pastorale entre Mandrare et Manambovo. ASG. A.1075, 23 p., 4 pl.
- (I) - 1956 (b).- Note sur l'hydrogéologie du Sud de Madagascar. Mémoires Inst.Scient.de Madagascar. Série D, t.VIII 1957 et DBG.n°126, p.129-132.
- (R)* - 1956 (c).- Etude hydrogéologique du Sud-Ouest de Madagascar. Rapp.Ann.Serv.Géol.Madagascar pour 1956. p.157-174, 1 pl.
- (R)* - 1957 (a).- Répertoire des points d'eau du Sud de Madagascar pour les zones I à V (Mandrare à Fiherenana).
- Introduction générale. ASG. A.1152, 7 p., 1 pl.
- Répertoire des points d'eau entre Mandrare et Manambovo (zone I). ASG. A.1162, 140 fiches.
- Répertoire des points d'eau entre Manambovo et Menarandra (zone II). ASG. A.1163, 151 fiches.
- Répertoire des points d'eau entre Menarandra et Linta (zone III). ASG. A.1134, 125 fiches.
- Répertoire des points d'eau entre Linta et Onilahy (zone IV). ASG. A.1154, 225 fiches.
- Répertoire des points d'eau entre Onilahy et Fiherenana (zone V). ASG. A.1155, 62 fiches.
- (R)* - 1957 (b).- Carte des points d'eau du Sud de Madagascar au 1/100.000.
- zone I ASG. C.811.
- zone II ASG. C.812.
- zone III ASG. C.941.
- zone IV ASG. C.951a et b.
- zone V ASG. C.948.

- (I)*AUROUZE J., 1957 (c).- Carte hydrogéologique du Sud de Madagascar au 1/500.000. Service géologique de Madagascar. Tananarive.
- (R)* - 1957 (d).- Notice explicative sur la carte hydrogéologique du Sud de Madagascar. Service géologique de Madagascar. Tananarive. 13p.
- (A) - 1957 (e).- Propositions pour un programme d'hydraulique pastorale entre Manambovo et Fiherenana (zone II, III, IV, V). ASG. A.1168. 13 p., 6 pl.
- (A) - 1957 (f).- Note récapitulative sur l'état des prospections hydrogéologiques et l'aménagement des points d'eau dans le Sud au 10 Mars 1957. ASG. A.1174, 7 p.
- (A) - 1957 (g).- Hydraulique pastorale entre Manambovo et Menarandra (zone II) ; secondes propositions. ASG. A.1201, 7 p., 1 pl.
- (R)* - 1957 (h).- Données et hypothèses actuelles sur l'hydrogéologie du Sud de Madagascar. Communication au 3ème congrès de la P.I.O.S.A. Tananarive. Contribution de Madagascar à la section de géologie. Serv.Géol.Mad. p.61-70.
- (A) - 1957 (i).- Note sur l'alimentation en eau d'Ampanihy (Sud de Madagascar). ASG. A.1258, 16 p., 2 pl.
- (A) - 1957 (j).- Note sur l'alimentation en eau de Betioky (Sud de Madagascar). ASG. A.1259, 9 p., 2 pl.
- (R) - 1957 (k).- Etudes hydrogéologiques dans l'Ouest et le Sud de Madagascar. Rapp. Ann. Serv. Géol. Mad. pour 1957, p.179-186, 5 pl.
- (A)* - 1958 (a).- Etude du débit des nappes aquifères dans le Sud de Madagascar. ASG. A.1287, 31 p., 7 pl.
- (A) - 1958 (b).- Propositions pour la création rapide et l'aménagement de points d'eau dans le Sud. ASG. A.1291, 14 p., 1 pl.
- (A) - 1958 (c).- Recherches d'eau dans le Sud de Madagascar. in Contribution du Service géologique aux journées interprovinciales des Travaux publics. ASG. A.1314, 6 p.

- (A) AUROUZE J., 1958 (d).- Sondage Ambatolahy Sud (rapport de fin de sondage). ASG. A.1333. 7 p., 3 pl.
- (A) - 1958 (e).- Sondage Ankatrafay (Rapport de fin de sondage). ASG. A.1337bis, 10 p., 2 pl.
- (A) - 1958 (f).- Modifications proposées au programme d'hydraulique pastorale entre Mandrare et Manambovo. ASG.A.1343, 6 p.
- (A) - 1958 (g).- Sondage Erada (Rapport de fin de sondage). ASG. A.1357. 11 p., 2 pl.
- (A) - 1958 (h).- Observations sur la remise en état et l'équipement des puits du Sud. Travaux possibles dans l'avenir. ASG. A.1358, 12 p., 1 pl.
- (A) - 1958 (i).- Note sur l'alimentation en eau de Soalara. ASG. A.1361. 3 p.
- (A) - 1958 (j).- Sondage Ankitry (Rapport de fin de sondage). ASG. A.1376. 11 p., 2 pl.
- (A) - 1958 (k).- Sondage d'exploitation Ankatrafay. Observations sur les essais de pompage. ASG. A.1379. 3 p., 3 pl.
- (A) - 1958 (l).- Sondage Ferme Ambovombe. Reprise Failing 1958. ASG. A.1389, 6 p., 1 pl.
- (A) - 1958 (m).- Note sur l'alimentation en eau d'Antanimora. ASG. A.1403, 11 p., 2 pl.
- (A) - 1958 (n).- Propositions pour un programme général d'hydraulique dans le Sud de Madagascar. ASG. A.1410. 60 p., 1 pl.
- (R) - 1958 (o).- Travaux hydrogéologiques dans le Sud. Rapp. Ann. Serv. Géol. Mad. pour 1958. p.147-170, 6 pl.
- (A) BESAIRIE H., 1929.- Rapport de mission 1929. ASG. A.41, 40 p.
- (I) - 1930.- Recherches géologiques à Madagascar. Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse, t.60, n°2.
- (A) - 1939.- Mission hydrogéologique dans l'Androy. Rapport sommaire. ASG. A.88, 12 p., 5 pl.

- (A) BESAIRIE H., 1943.- Géologie du Sakoa-Mozambique. Note n°2 Hydrogéologie. ASG. A.117, 3 p., 1 pl.
- (A) - 1944.- Hydrogéologie de l'extrême Sud de Madagascar. ASG. A.129, 32 p.
- (A) - 1945 (a).- Rapport annuel du Bureau géologique pour l'année 1944. ASG. A.144, 9 p.
- (A) - 1945 (b).- Note complémentaire sur les eaux du Mahafaly (6 Juillet 1945). ASG. A.156, 1 p.
- (A) - 1947.- Tournée du Sud (du 14 Avril au 4 Juillet 1947). 1ère partie. ASG. A.229, 132 p.
- (R)² - 1948 (a).- Recherches géologiques à Madagascar (2^{ème} suite). L'extrême Sud et le Sud-Est. 2 volumes. ASG. A.285 (voir pp.227-287).
- (A) - 1948 (b).- Note au sujet des sondages de l'Androy. ASG. A.273, 2 p.
- (A) - 1948 (c).- Rapport annuel du Bureau géologique pour l'année 1948. ASG. A.284.
- (I) - 1948 (d).- Carte géologique de reconnaissance de Madagascar, à l'échelle du 1/200.000 et notices explicatives. Publ.Serv.Géol.Madagascar et Imprimerie Nationale, Paris. Feuilles Ampanihy (604), Bekily (605), Ampotaka (624), Tsihombe (625), Ambovombe (626), Behara-Fort-Dauphin (626-627).
- (I) - 1949.- Carte géologique de reconnaissance de Madagascar, à l'échelle du 1/200.000. Edition provisoire. Publ. Serv.Géol.Mad. Feuilles Tuléar-Efoetsy (582-602), Betioky (583), Itampolo (603), Androka (623).
- (A) - 1950.- Note sur la chloruration des puits Friry de l'Androy. ASG. BG.130.
- (I)² BESAIRIE H. et PAVLOVSKY R., 1950.- Carte hydrogéologique du Sud de Madagascar à l'échelle du 1/500.000. TBG.n°16.
- (A) BESAIRIE H., 1951.- Le sondage BW.1 de la S.P.M. à Bezaha et son enseignement hydrogéologique. ASG. A.443, 3 p.

- (R) BESAIRIE H., 1952.- Premiers résultats des sondages de recherches d'eau dans le Sud. Rapp. Ann. Serv. Géol. Mad. pour 1952, pp. 177-179.
- (A) - 1952-1953.- Sondages de l'Androy. Tableaux n°1 à 6. ASG. C.428, 442, 474, 475, 476, 477.
- (R) BESAIRIE H., 1953 (a).- Carte minière et des indices de Madagascar. Notices explicatives. TBG. n°52.
- (R) - 1953 (b).- Les sondages de recherche d'eau dans le Sud. Rapp. Ann. Serv. Géol. Mad. pour 1953, p. 143-146.
- (A) - 1954.- Second programme de recherche d'eau dans le Sud. Propositions du Service géologique. ASG. A.752. 11 p., 4 pl.
- (R)* - 1955 (a).- Hydrogéologie du Sud de Madagascar (septembre 1948). DBG. n°104, 74 p., 14 pl.
- (R) - 1955 (b).- Résultats et observations sur les sondages de recherche d'eau effectués à Madagascar de Mars 1954 à Mars 1955. DBG. n°97, 33 p., 17 pl.
- (A)* BESAIRIE H. et AUROUZE J., 1955-1956.- Deuxième campagne de recherche d'eau dans le Sud de Madagascar. Coupes des sondages. ASG. A.7037 et C.725. 25 pl.
- (I) BESAIRIE H., 1956.- Carte minière et des indices de Madagascar à l'échelle du 1/500.000. Publ. Serv. Géol. Tananarive.
- (A) - 1957 (a).- Sondage Ferme Ambovombe. Juillet-Août 1957. ASG. A.1230, 3 p., 1 pl.
- (A) - 1957 (b).- Sondage Tsianoha. ASG. C.1059, 1 pl.
- (A) BESAIRIE H. et AUROUZE J., 1958.- Note au sujet d'une prospection géophysique pour recherches d'eau dans le Sud de Madagascar. ASG. DG.901, 5 p., 5 pl.
- (R) BESAIRIE H., 1958.- Contribution à l'étude des eaux souterraines. Rapp. Ann. Serv. Géol. Mad. pour 1958, pp. 215-222.
- (A) BOULANGER J., 1955.- Etude de la salinité des eaux de l'embouchure de l'Onilahy. ASG. A.923, 4 p.

- (R) BRENON P., 1955.- Etude générale des gisements de mica phlogopite du Sud de Madagascar (campagne 1954). ASG. A.862.
- (I) CARLE G., 1910.- Note sur des recherches d'eau dans le Sud-Ouest. Bull. Ec.Madag. 2^{ème} semestre 1910, p.152-168.
- (A) (CATHERINE, 1929).- Rapport annuel sur la Ferme Vétérinaire d'Ambovombe. Arch.Serv.Vétérinaire Mad.
- (A) (CHAVATTE, 1941).- Rapport sur l'élevage des boeufs et des moutons à laine dans la région de Fort-Dauphin. Arch.Serv.Vétérinaire Madag.
- (A) CHEVRIER, 1950.- Compte-rendu de la situation générale des puits de l'Androy au 16 Mars 1950. Arch.Serv.Prov.Tr.Publ. Tuléar. n°776/JE du 17 Avril 1950.
- (A) (CROUZET, 1935).- L'aménagement hydraulique du Sud de Madagascar. ADGTP.
- (I) (DECARY R., 1918).- Note hydrologique sur l'extrême Sud de Madagascar. Revue agricole et vétérinaire. Tananarive, n°26.
- (I) - 1928.- Contribution à la géologie de l'extrême Sud de Madagascar. Bull.Soc.Géol.France, 4^{ème} série, p.401-414.
- (I) - 1930.- L'Androy (Extrême Sud de Madagascar) ; 1^{er} volume, 222 p. Paris.
- (I) (- 1931).- Contribution à l'hydrogéologie de l'extrême Sud de Madagascar. Bull.Académie malgache. Tananarive, tome 14.
- (I) - 1933.- L'Androy, 2^{ème} volume, 284 p. Paris.
- (A) - ?.- Les nappes d'eau de Madagascar. ASG. A.274, 79 p.
- (A) GIRAUD, 1912 (a).- Rapport de mission à Madagascar (26 Novembre 1910-26 Juillet 1911). ASG. A.2 et B.96, 129 p.
- (I) - 1912 (b).- Note sur l'alimentation en eau des régions du Cap Sainte Marie, Faux-Cap, Ambovombe et de la ville de Fort-Dauphin. Bull.Ec.Mad.2^{ème} semestre 1912, n°1, p.63-67.

- (A) LAPLAINE L., 1958.- Essais du sondage Tsianoha n°2 le 26 Février 1958. ASG. A.1295, 7 p., 2 pl.
- (A) LAUTEL R., 1952.- Note pour l'alimentation en eau de Zafary (Androy). ASG. A.503, 1 p.
- (A) (MARNAY P., 1948).- Note sur les puits de l'Androy. Arch.du district de l'Androy (20 Septembre 1948) et Arch.Serv.Prov.Tr. Publ.Tuléar (3 Novembre 1948).
- (A) NOIZET G., 1953.- Recherches d'emplacements pour forage de puits dans le canton de Bekitro (district de Bekily). ASG. A.664, 3 p.
- (A) PAVLOVSKY R., 1949.- Les recherches hydrogéologiques dans l'extrême Sud. Rapp.Ann.Bureau géol.Mad.pour 1949, p.52-63.
- (A) - 1950 (a).- Recherches hydrogéologiques dans l'extrême Sud de Madagascar (campagne 1949). ASG. A.370.
- (R)≠ - 1950 (b).- Recherches hydrogéologiques dans l'extrême Sud de Madagascar (campagne 1949). TBG.n°10, 34 p.
- (R) - 1950 (c).- Les recherches hydrogéologiques dans l'extrême Sud. Rapp.Ann.Bureau géol.Mad.pour 1950, p.6-14, 1 pl.
- (R)≠ - 1951.- Recherches hydrogéologiques dans la zone côtière du pays Mahafaly (campagne 1950), TBG.n°18, 8 p.
- (A) - 1952.- Rapport de mission dans l'Androy. Reconnaissance des points de travaux. ASG. A.461, 4 p.
- (A) - 1954 (a).- Recherches d'eau Ampanihy-Ejeda-Betioky. ASG. A.750, 10 p.
- (R) - 1954 (b).- Recherches hydrogéologiques dans la région Ampanihy-Betioky. Rapp.Ann.Serv.Géol.Mad.pour 1954, p.131-134, 1 pl.
- (A) RAJAONARIVELO, 1948.- Rapport de mission de la brigade RAJAONARIVELO dans le plateau calcaire Mahafaly. Mars-Avril 1948. ASG. A.258, 51 p.
- (A) RANDRIMARIVONY J., 1956.- Les points d'eau de la région d'Ambondro. ASG. Rapport mensuel Avril-Mai 1956.

- (I) REYNIER F., 1915-1916.- Améliorations agricoles dans le Sud-Ouest.
Bull.Ec.Madagascar, 1^{er} semestre 1915, n°1, p.199-209.
- (R) ROBILIARD R.de, 1949.- La présence de nitrates dans les eaux de puits du Sud-Ouest et du Sud de Madagascar. Bull.Géologique de Madagascar, fasc.1, p.88-90.
- (A)* SAINT OURS J.de, 1954 (a).- Etude hydrogéologique du Nord-Ouest du bassin d'Ambovombe (Ambaliandro). ASG. A.725, 6 p., 1 pl.
- (R) - 1954 (b).- Etude hydrogéologique de la région Ambaliandro-Antanimora (district de l'Androy). Rapp.Ann.Serv. Géol.Mad.pour 1954, p.139-140, 1 pl.
- (A)* - 1954 (c).- Etude hydrogéologique de la région de Tsimilofo et de Lovokarefo. ASG. A.733, 10 p., 1 pl.
- (R) - 1954 (d).- Etude hydrogéologique de la région Belohabekitro (district de l'Androy). Rapp.Ann.Serv.Géol. Mad.pour 1954, p.135-137, 1 pl.
- (A) - 1955 (a).- Recherche d'un emplacement de sondage entre le PK.349 et Ambovombe. ASG. A.838, 1 p.
- (A) - 1955 (b).- Recherche de points d'eau dans la dépression d'Ankazomanga (district de Betioky). ASG. A.839.
- (A) - 1955 (c).- Piquetage de deux emplacements de sondage dans la dépression d'Ankazomanga (district de Betioky). ASG. A.850, 1 p.
- (R) SAINT OURS J.de et GIRAUD P., 1956.- Prospection d'argile pour la fabrication de ciment dans la région de Soalara.
TBG.n°70, 77 p.
- (A) SAINT OURS J.de, 1958.- Note sur l'alimentation en eau de Soalara. ASG. A.1361, 4 p.

D E U X I E M E T H E S E

Proposition donnée par la Faculté

Géologie de la région orientale de Madagascar, entre
le méridien de l'Alaotra et la côte, de Mananara à
Fenerive.

Vu et approuvé
Paris le

Le Doyen de la Faculté des Sciences
signé: J. PERES

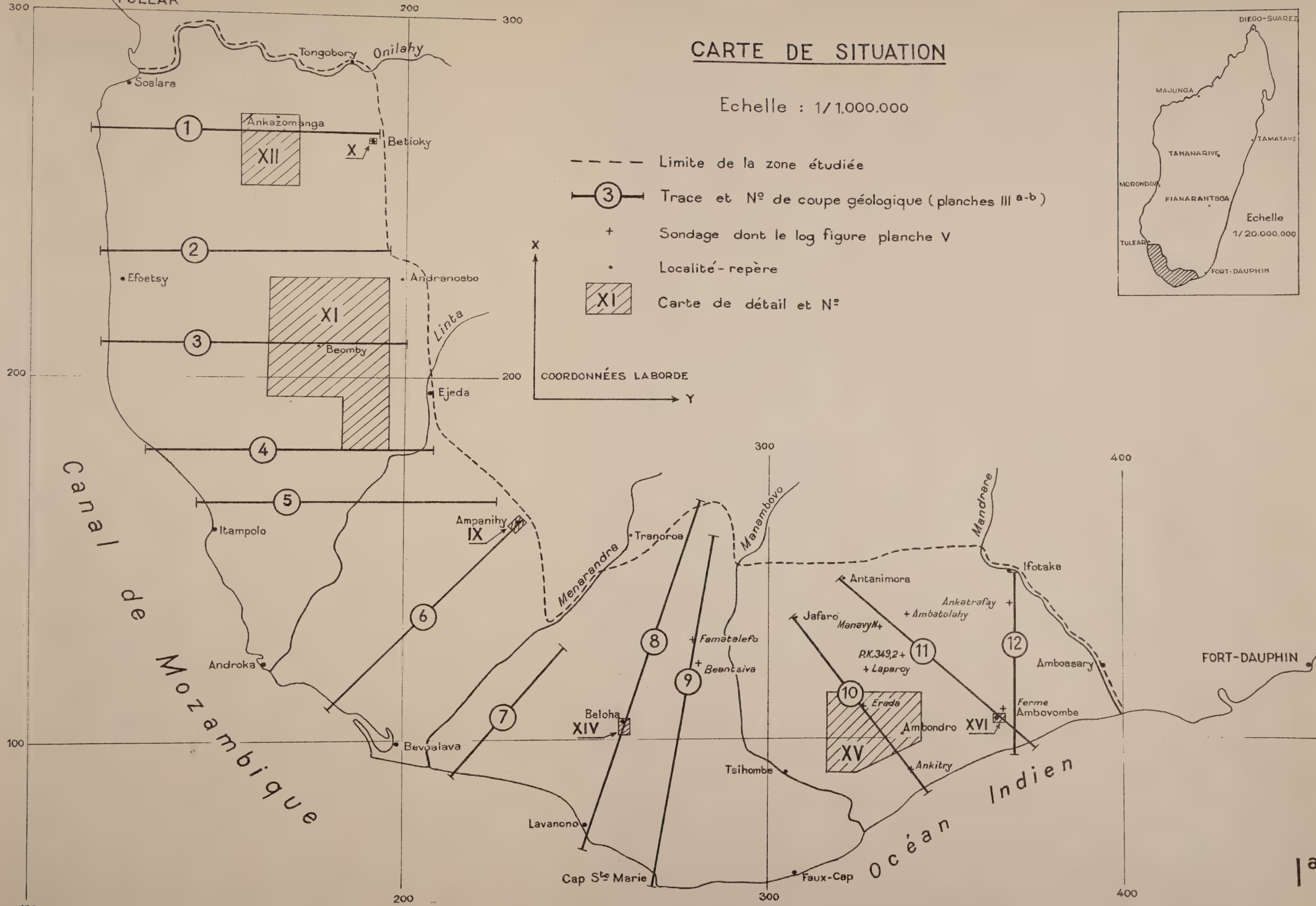
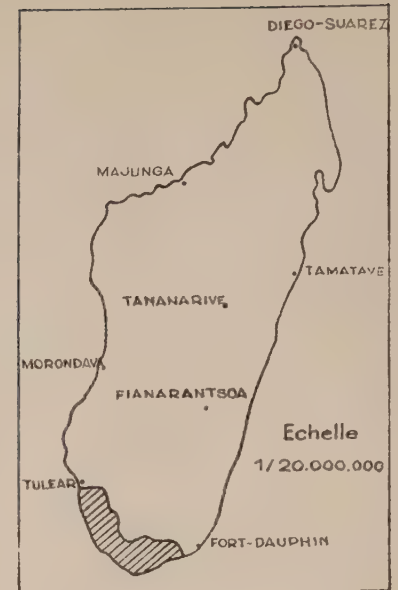
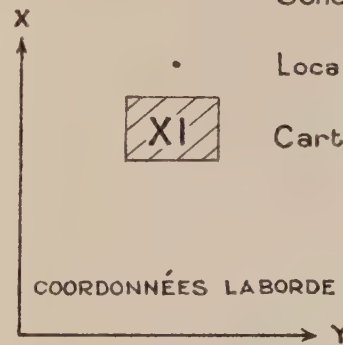
Vu et Permis d'imprimer
Paris le

Le Recteur
signé:

CARTE DE SITUATION

Echelle : 1/1.000.000

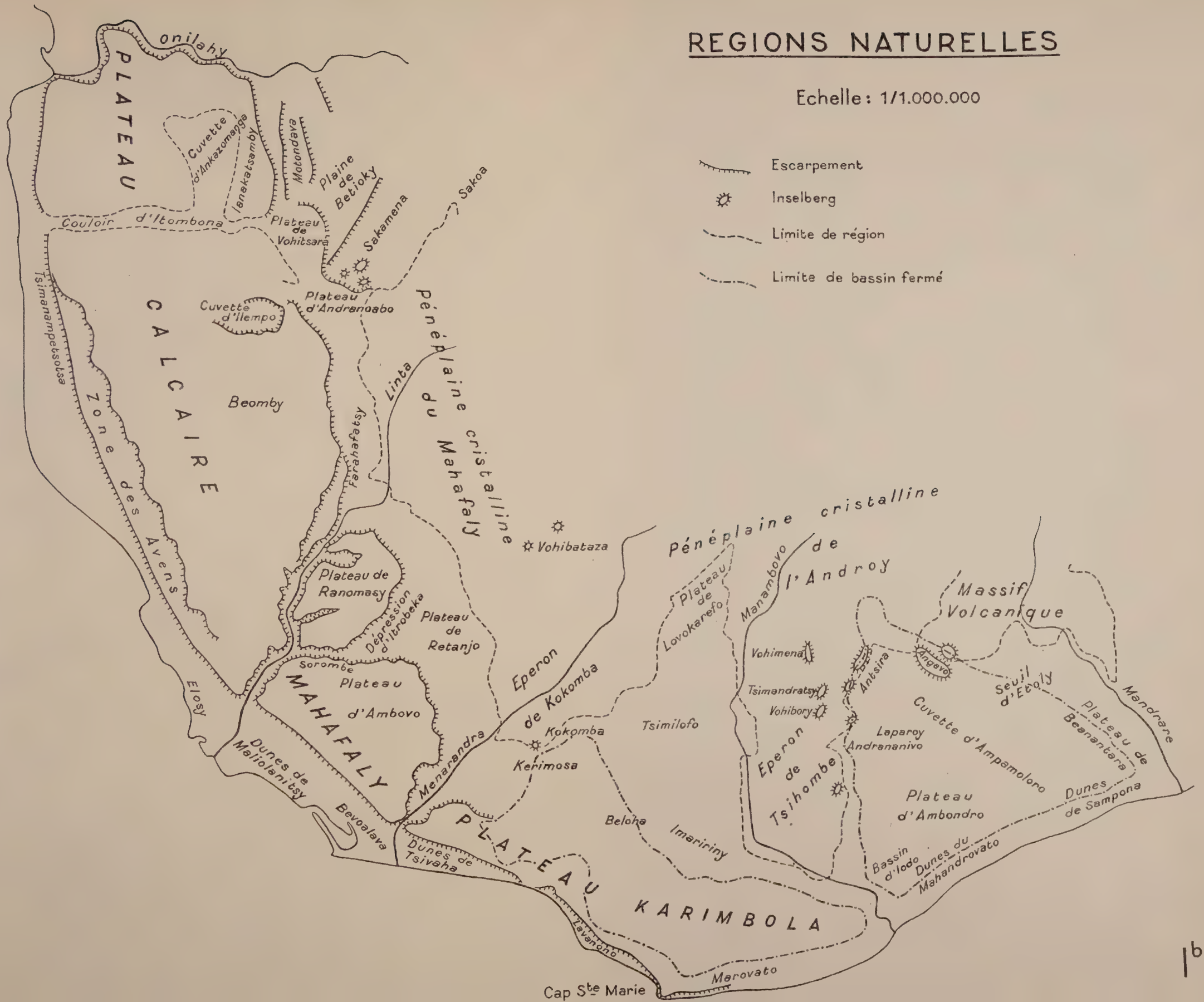
- Limite de la zone étudiée
- ③ Trace et N° de coupe géologique (planches III a-b)
- + Sondage dont le log figure planche V
- Localité-repère
- XI Carte de détail et N°



REGIONS NATURELLES

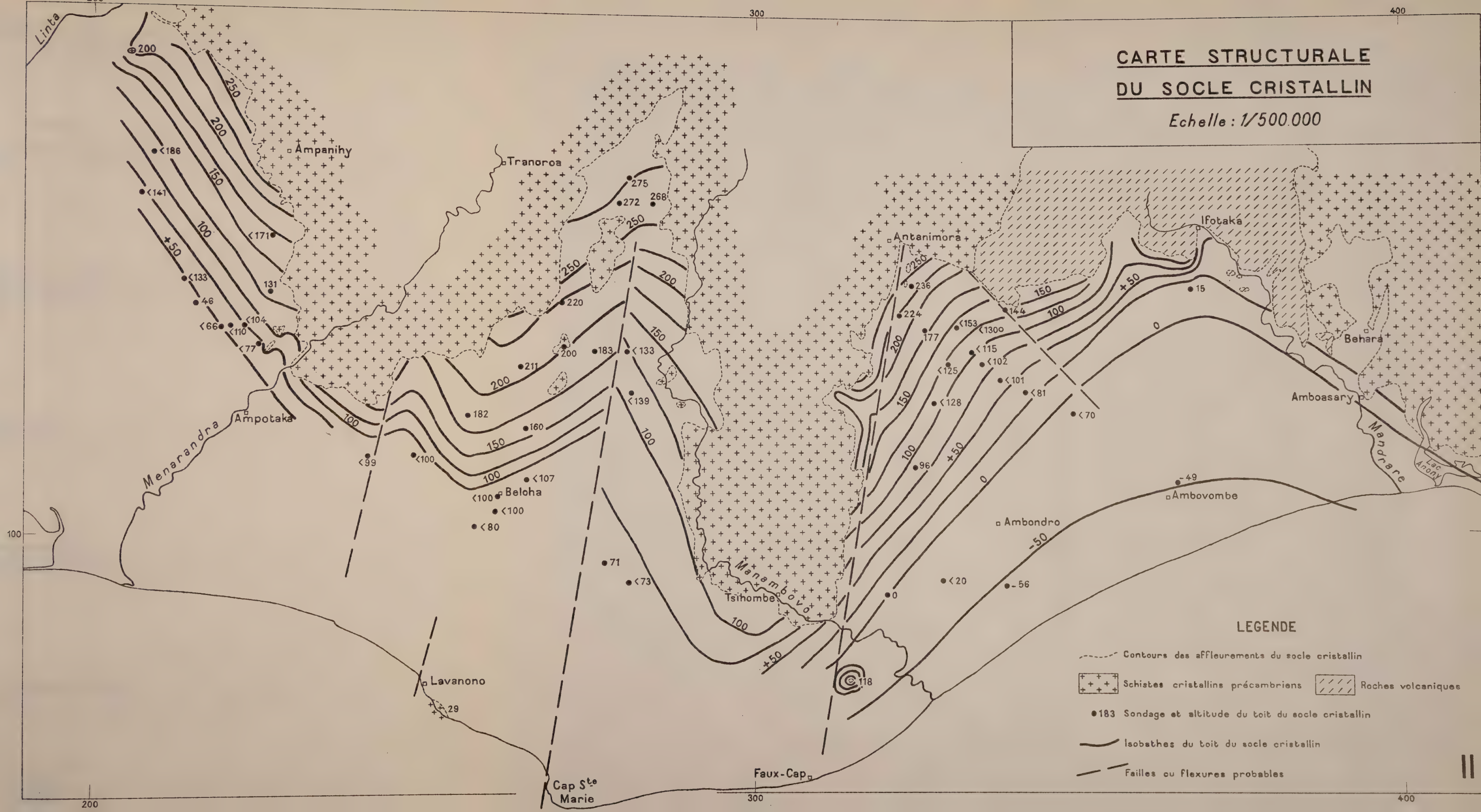
Echelle: 1/1.000.000

-  Escarpement
-  Inselberg
-  Limite de région
-  Limite de bassin fermé



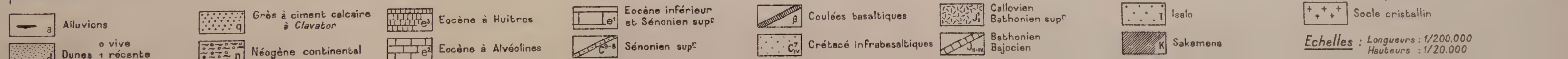
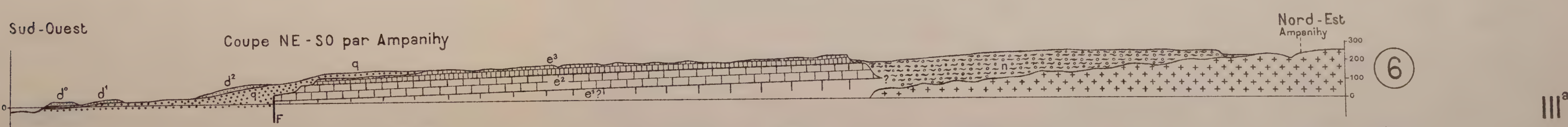
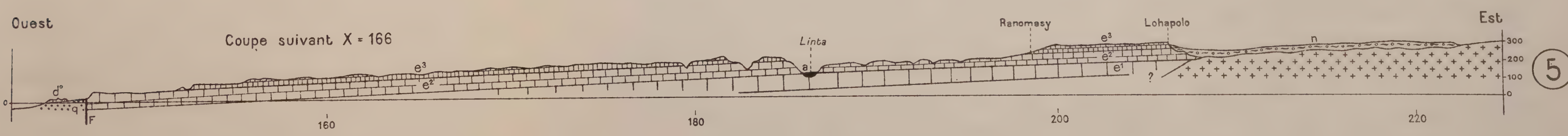
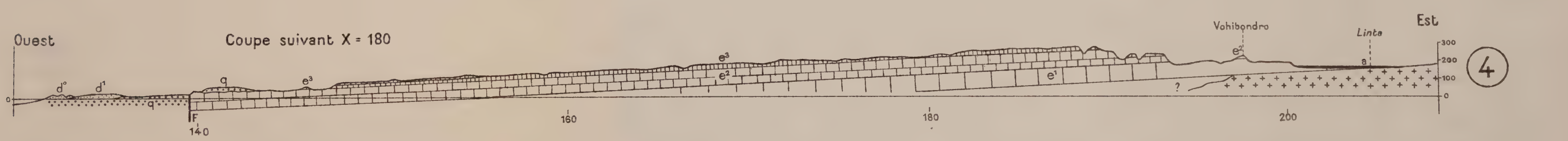
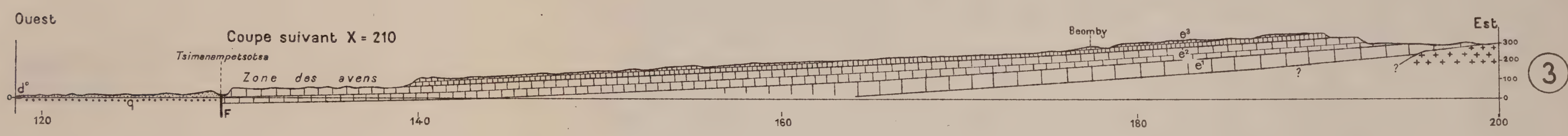
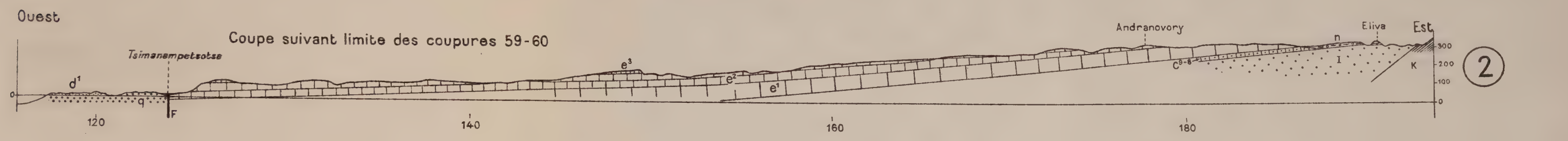
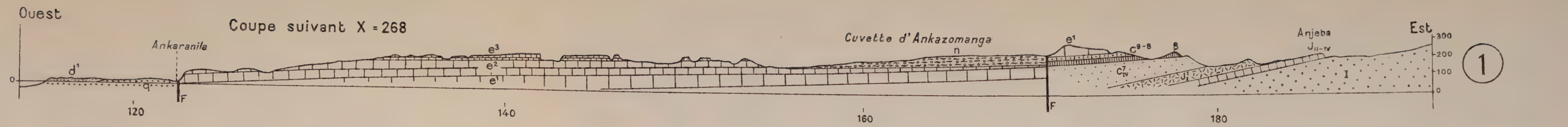
CARTE STRUCTURALE DU SOCLE CRISTALLIN

Echelle : 1/500.000

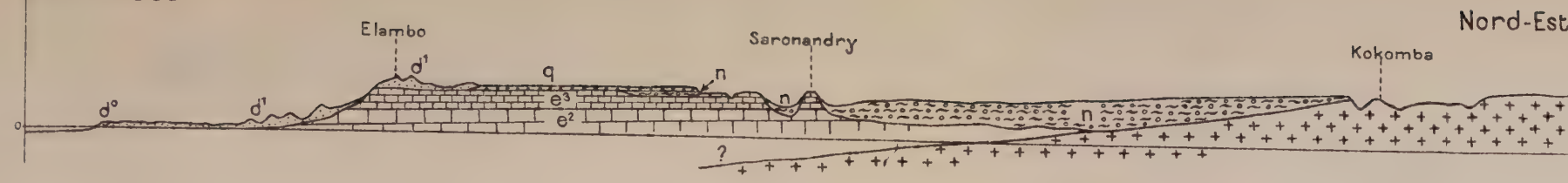


LEGENDE

- Contours des affleurements du socle cristallin
- Schistes cristallins précambriens
- Roches volcaniques
- 183 Sondage et altitude du toit du socle cristallin
- Isobathes du toit du socle cristallin
- Failles ou flexures probables



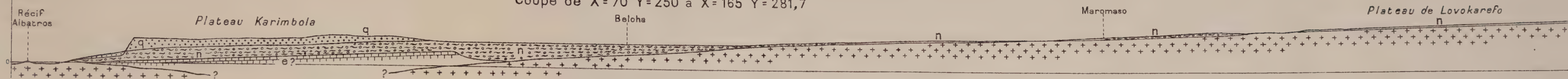
Sud-Ouest



7

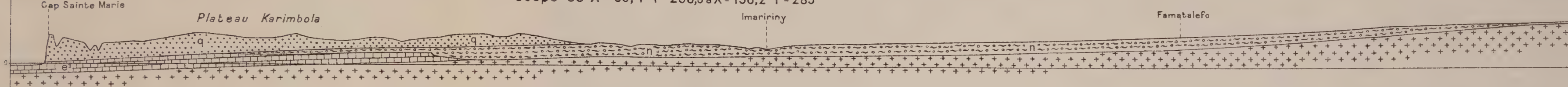
Coupe de X = 91,1 à X = 125,4
Y = 214,6 à Y = 244,0

Sud



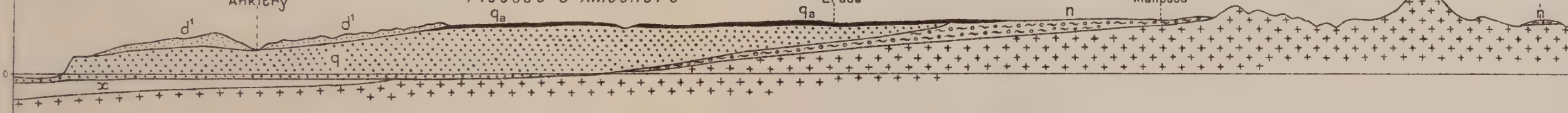
Coupe de X = 70 Y = 250 à X = 165 Y = 281,7

Sud



Coupe de X = 59,4 Y = 268,8 à X = 156,2 Y = 285

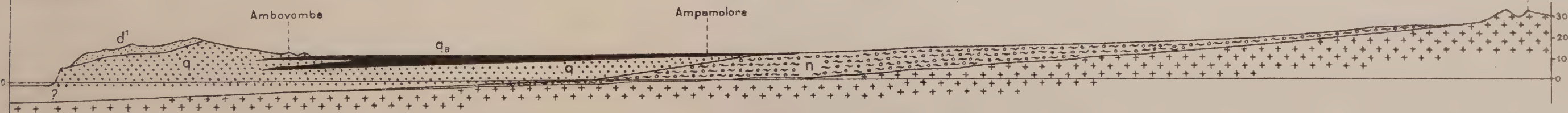
Sud-Est



10

Coupe de X = 85,2 à X = 133,7
Y = 344,0 à Y = 306,3

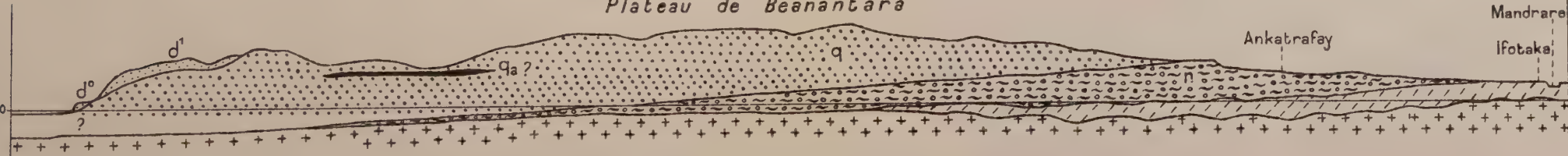
Sud-Est



11

Coupe de X = 98,4 à X = 144,7
Y = 372,4 à Y = 319,6

Sud



12

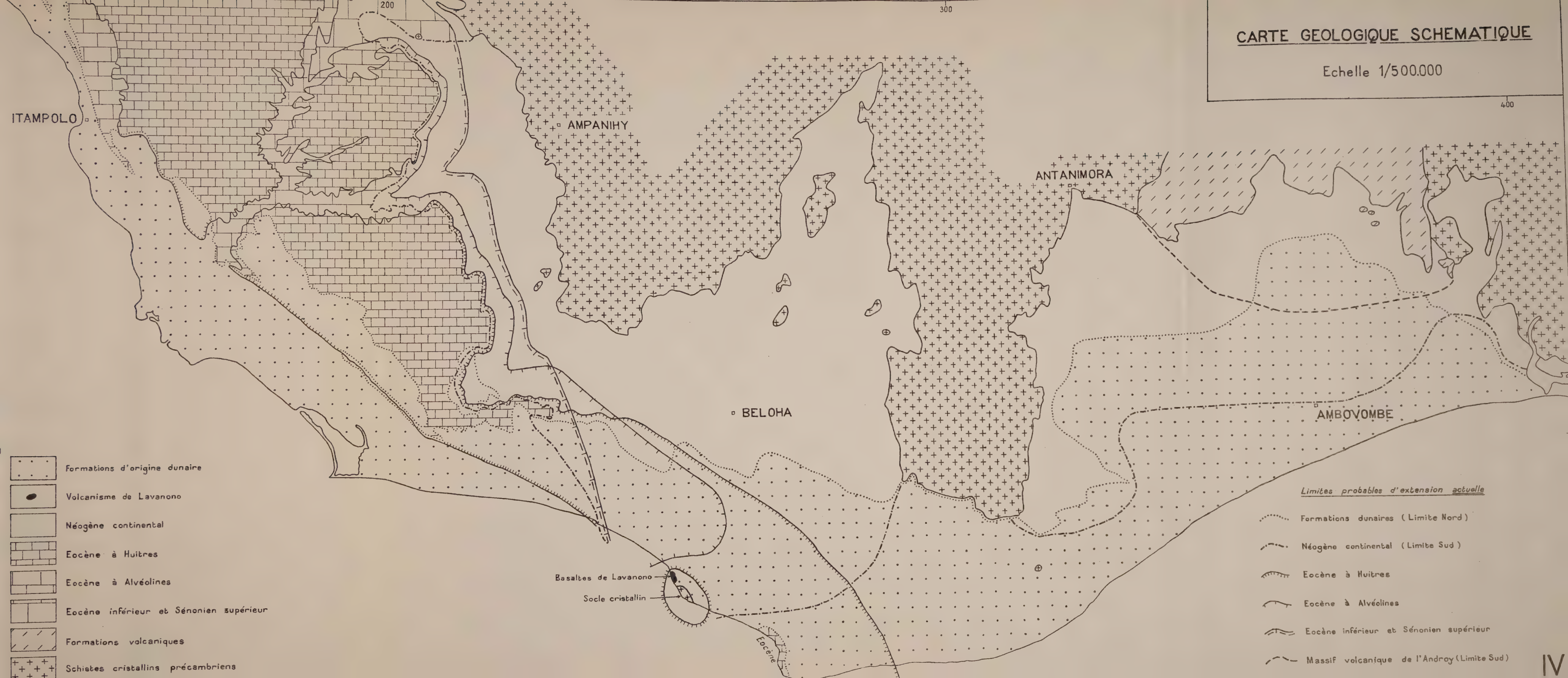
Coupe suivant Y = 369

Echelles: Longueurs: 1/200.000
Hauteurs: 1/20.000

CARTE GEOLOGIQUE SCHEMATIQUE

Echelle 1/500.000

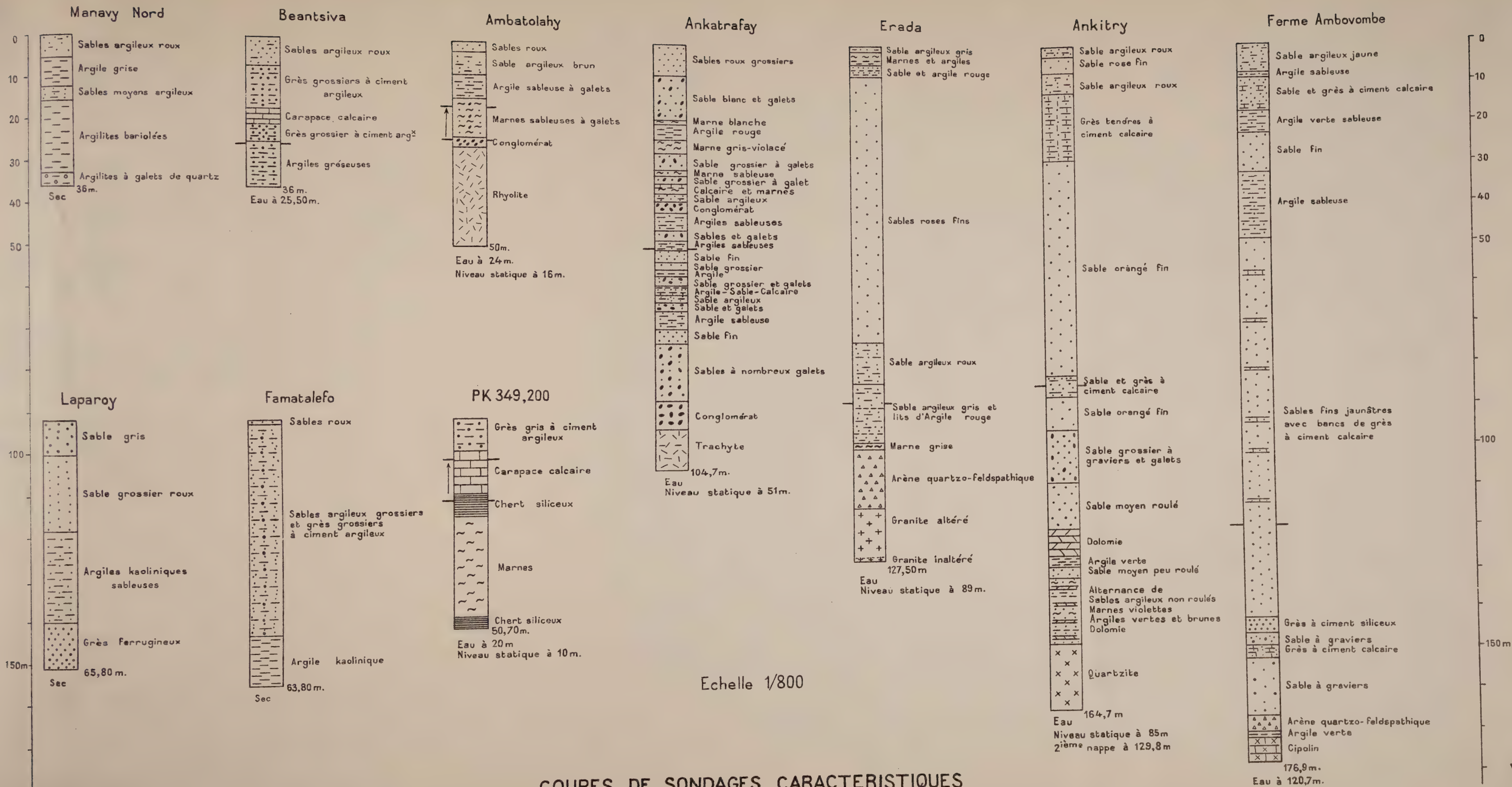
400



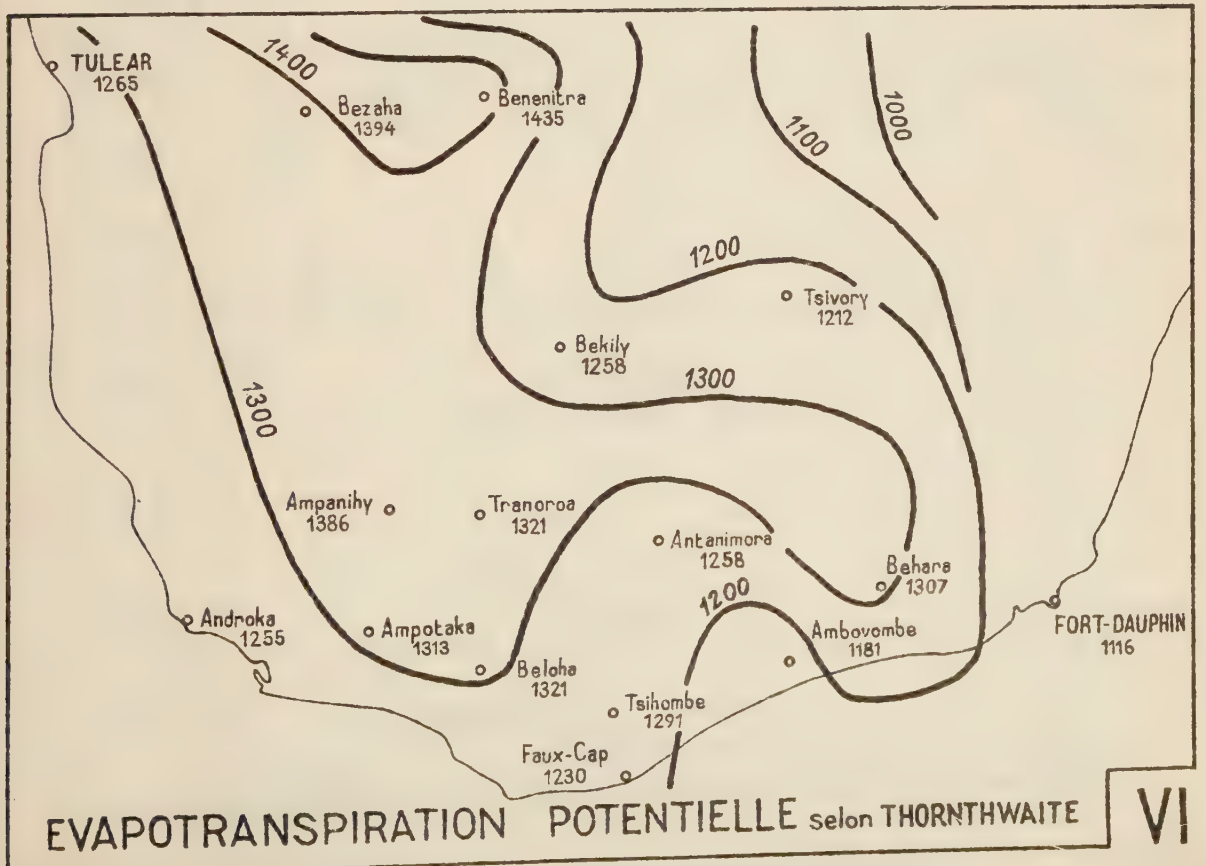
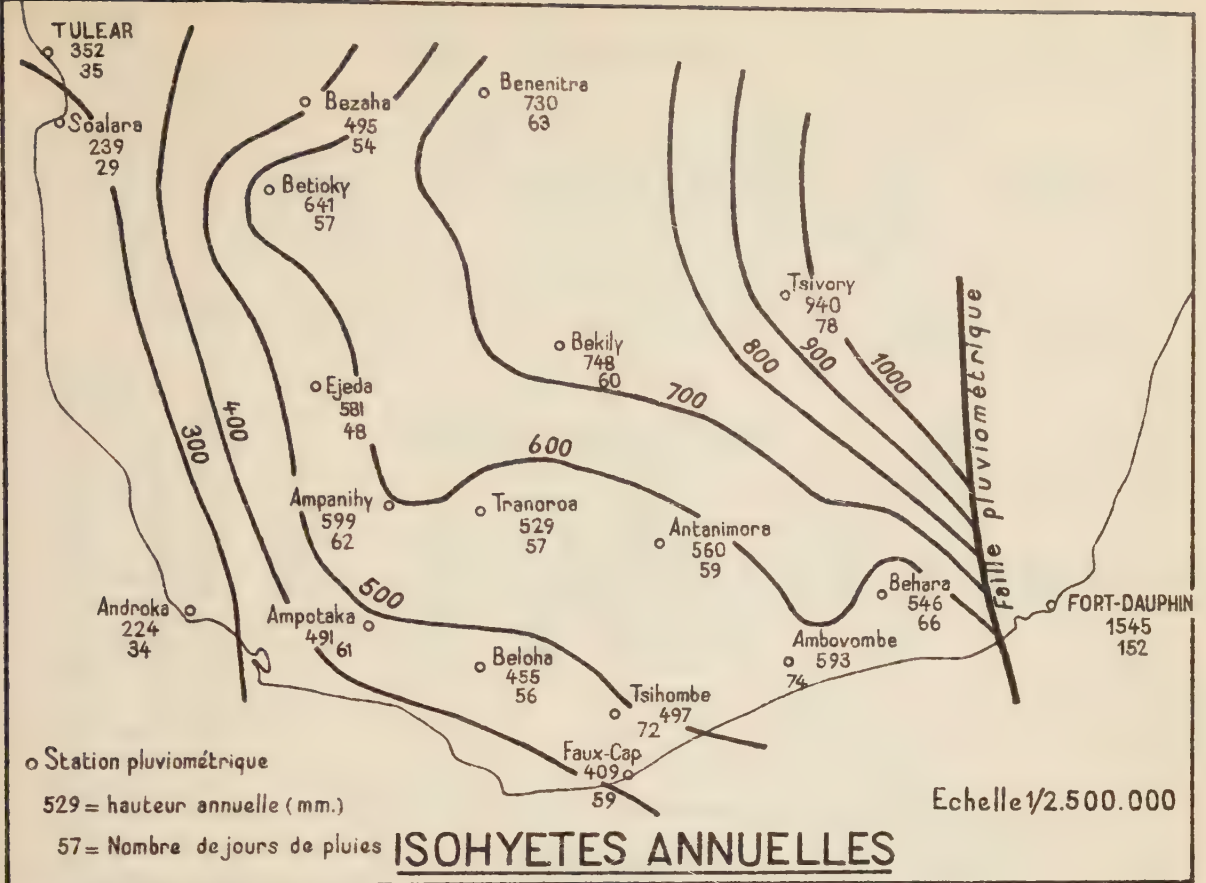
- Formations d'origine dunaire
- Volcanisme de Lavanono
- Néogène continental
- Eocène à Huitres
- Eocène à Alvéolines
- Eocène inférieur et Sénonien supérieur
- Formations volcaniques
- Schistes cristallins précambriens

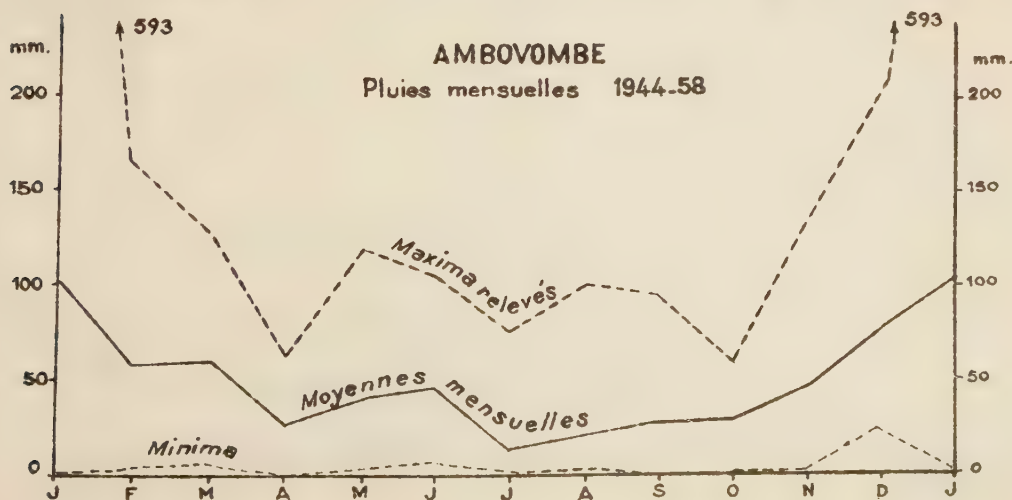
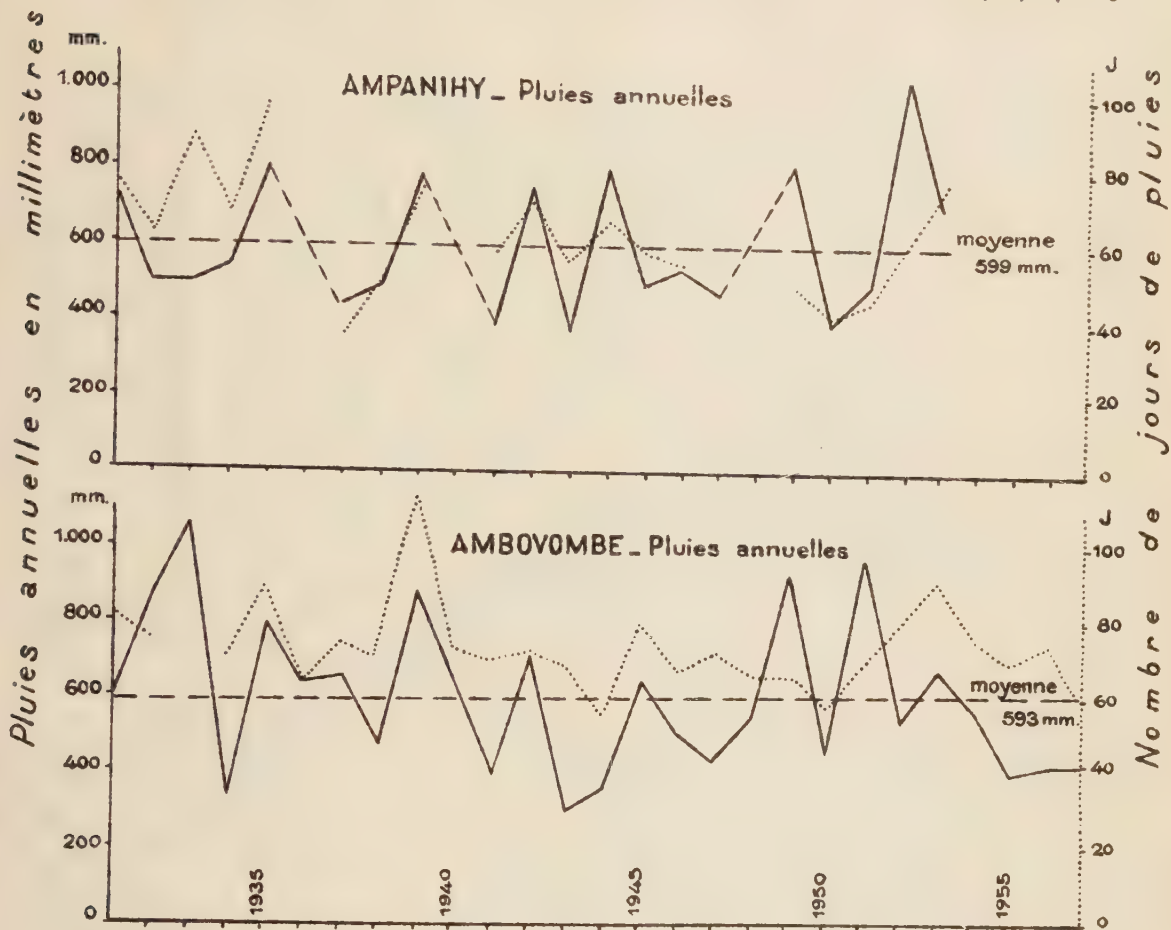
Limites probables d'extension actuelle

- Formations dunaires (Limite Nord)
- Néogène continental (Limite Sud)
- Eocène à Huitres
- Eocène à Alvéolines
- Eocène inférieur et Sénonien supérieur
- Massif volcanique de l'Androy (Limite Sud)



COUPES DE SONDAGES CARACTERISTIQUES

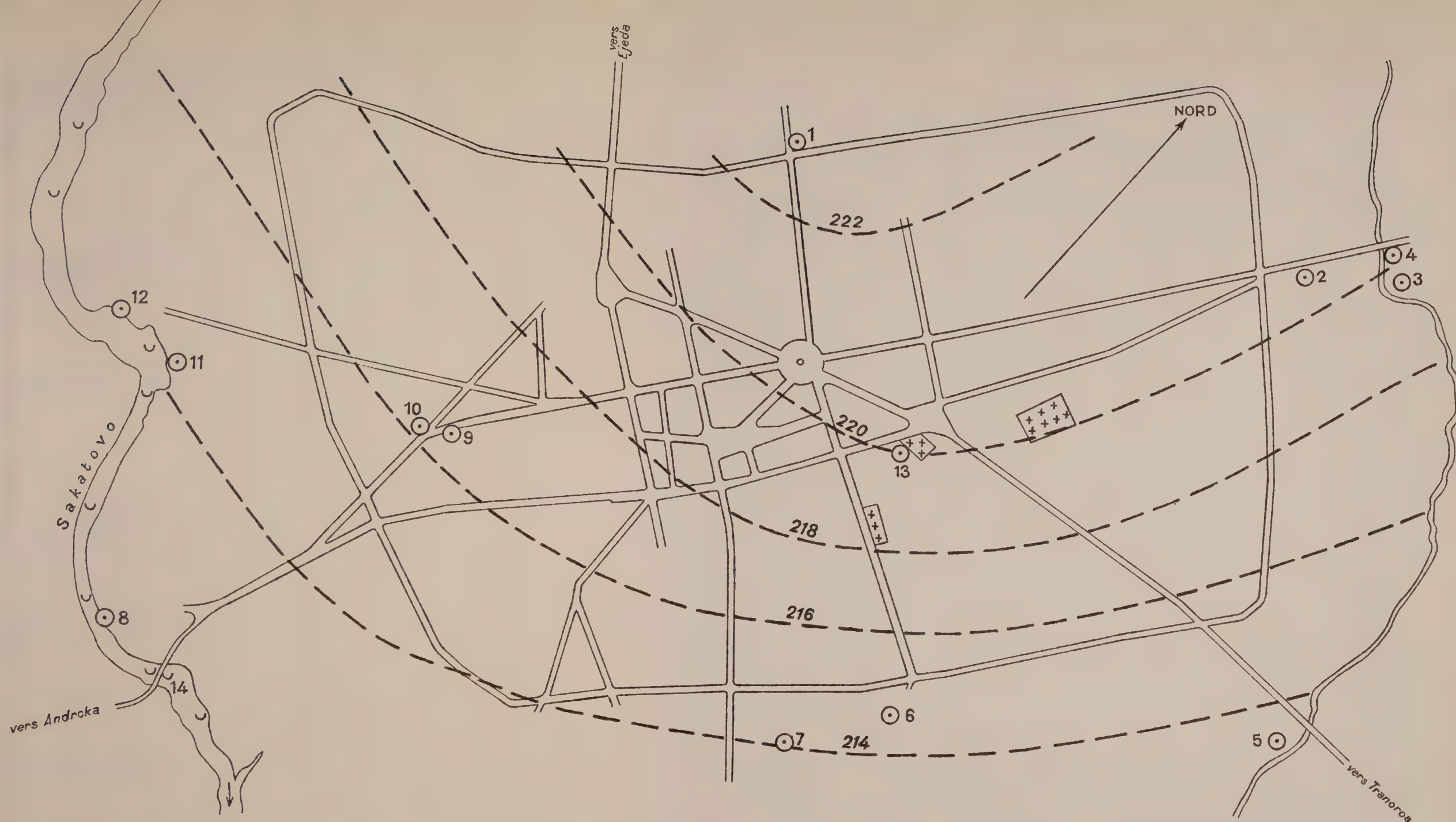




NAPPE GENERALE

Echelle 1/500.000





NAPPE DU SOCLE A AMPANIHY

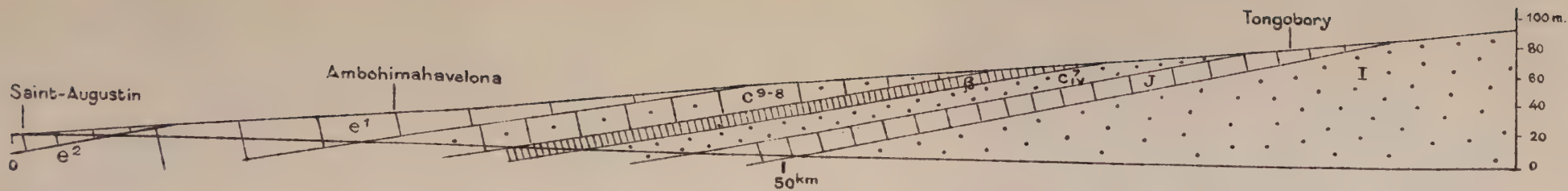
Echelle : 1/5.000

○⁸ Puits et N°

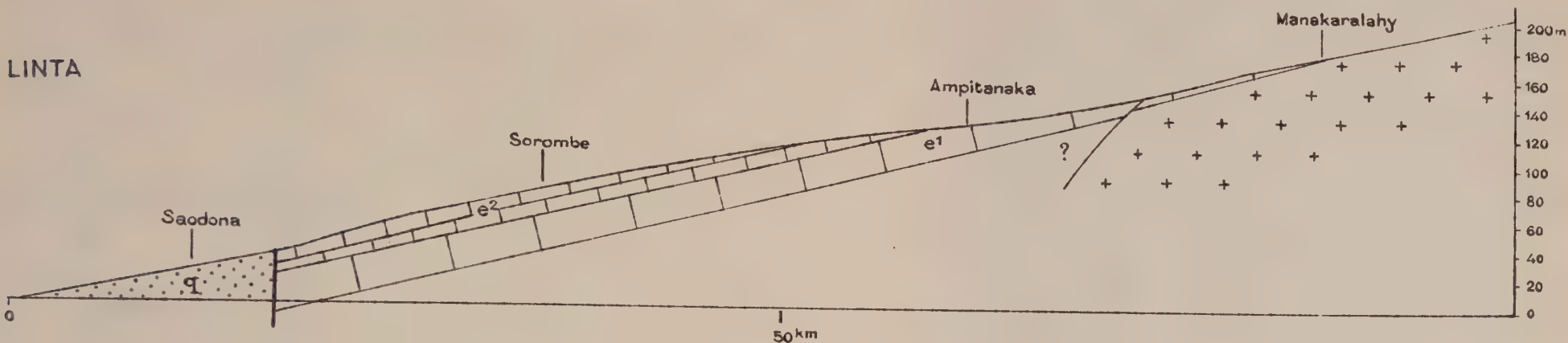
∪ Sous-écoulement permanent

— Couches isopièzométriques de la nappe (Juillet 1956)

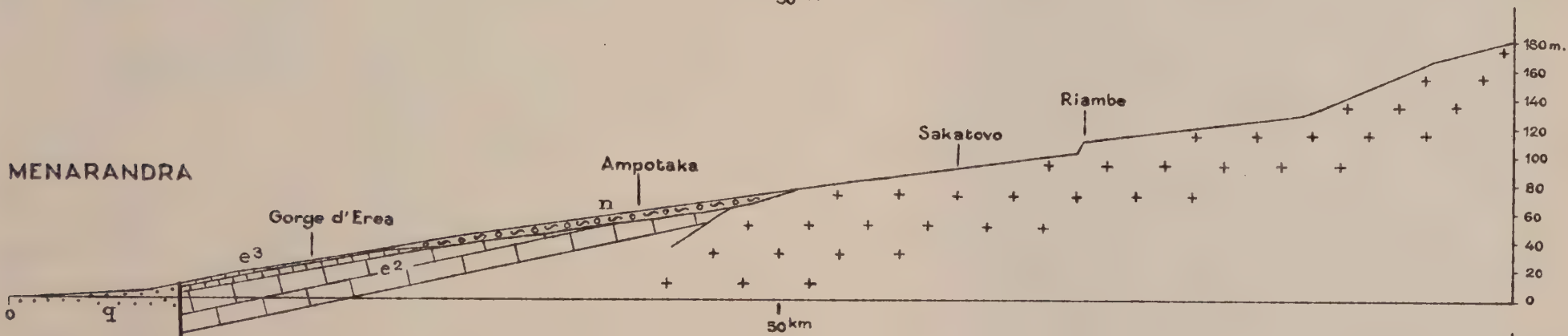
ONILAHY



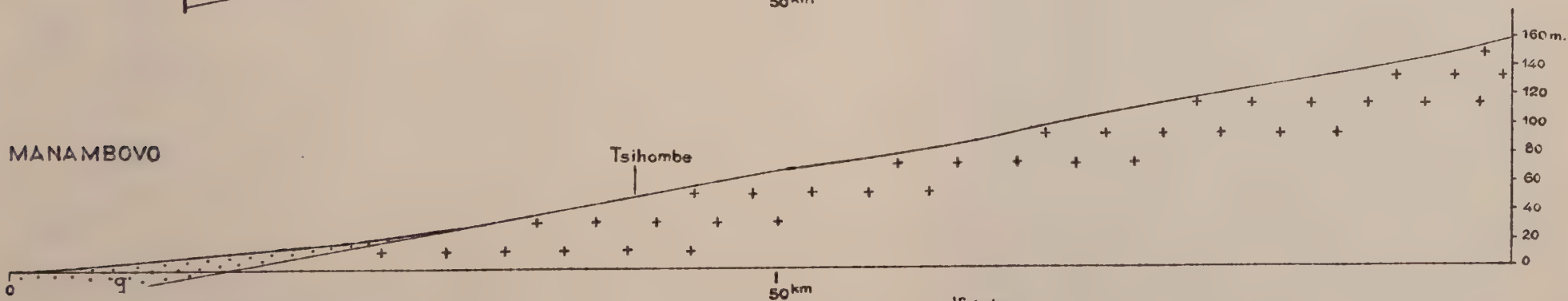
LINTA



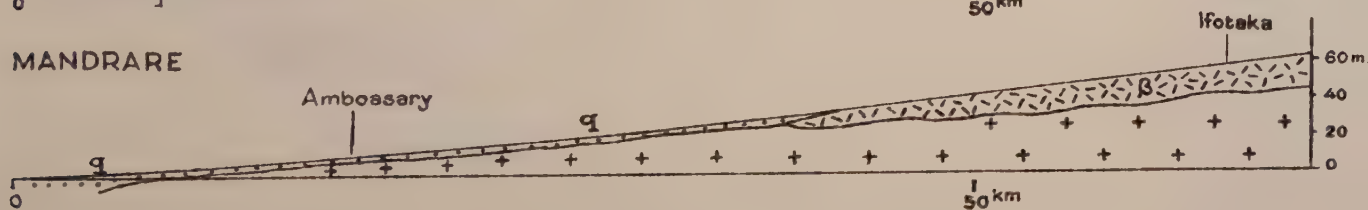
MENARANDRA



MANAMBOVO



MANDRARE



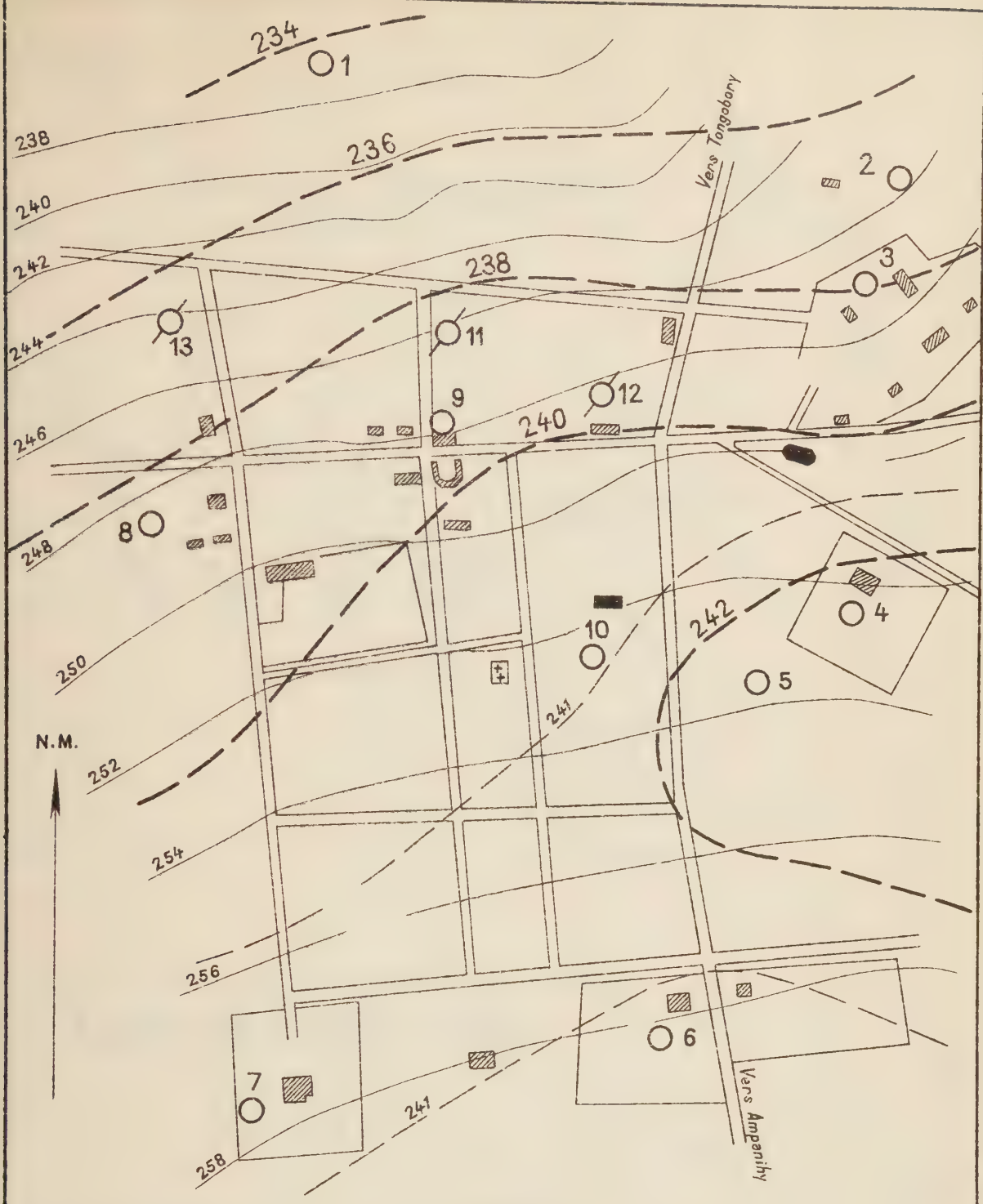
Echelles : Long. : 1/400.000

Haut. : 1/4.000

Légende géologique : cf planche III

PROFILS EN LONG DES FLEUVES

X



NAPPE DE BETIOKY

Echelle 1/5.000



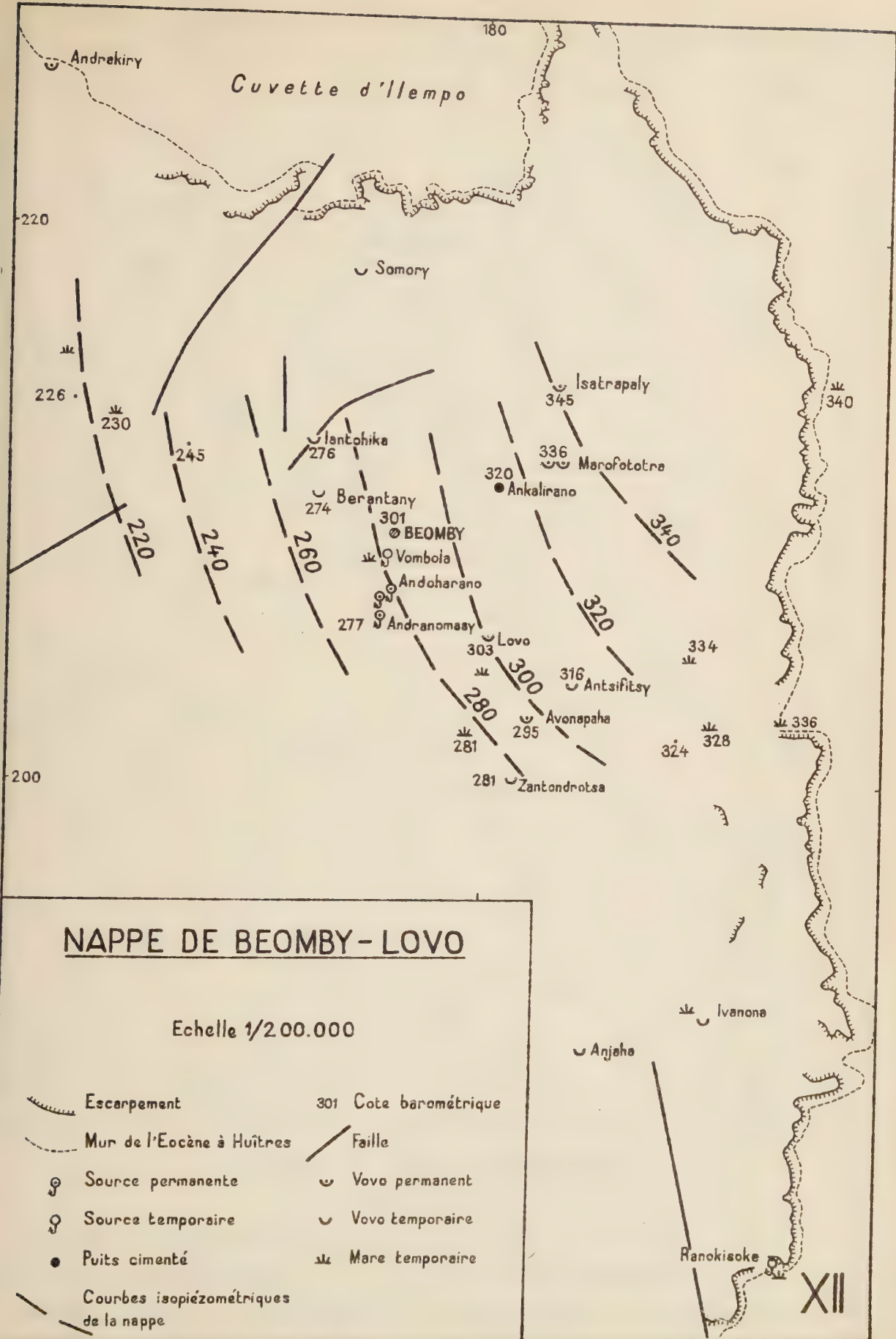
Puits

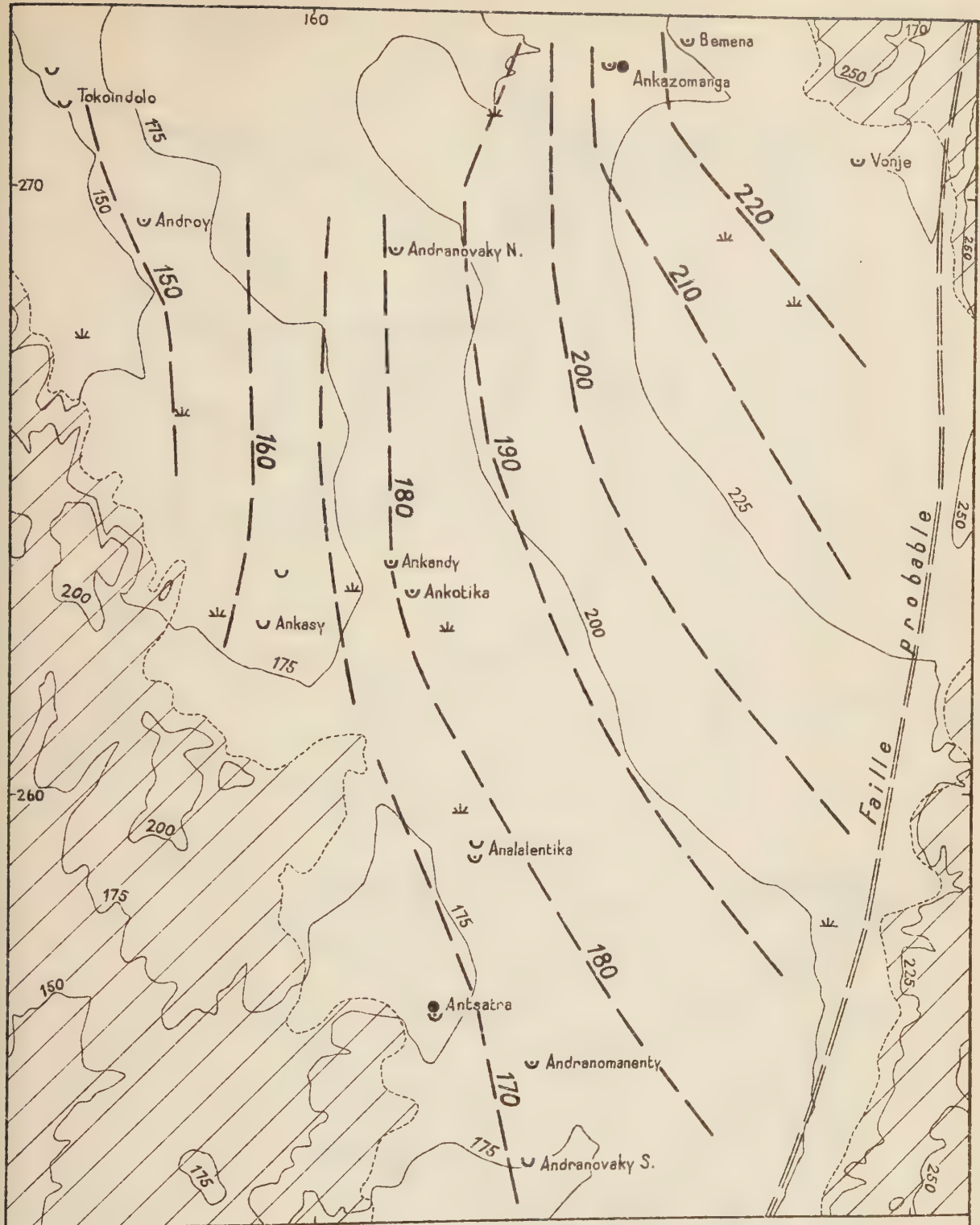
Puits comblé

— Courbe de niveau du sol

- - - Courbe isopièzométrique de la nappe

XI

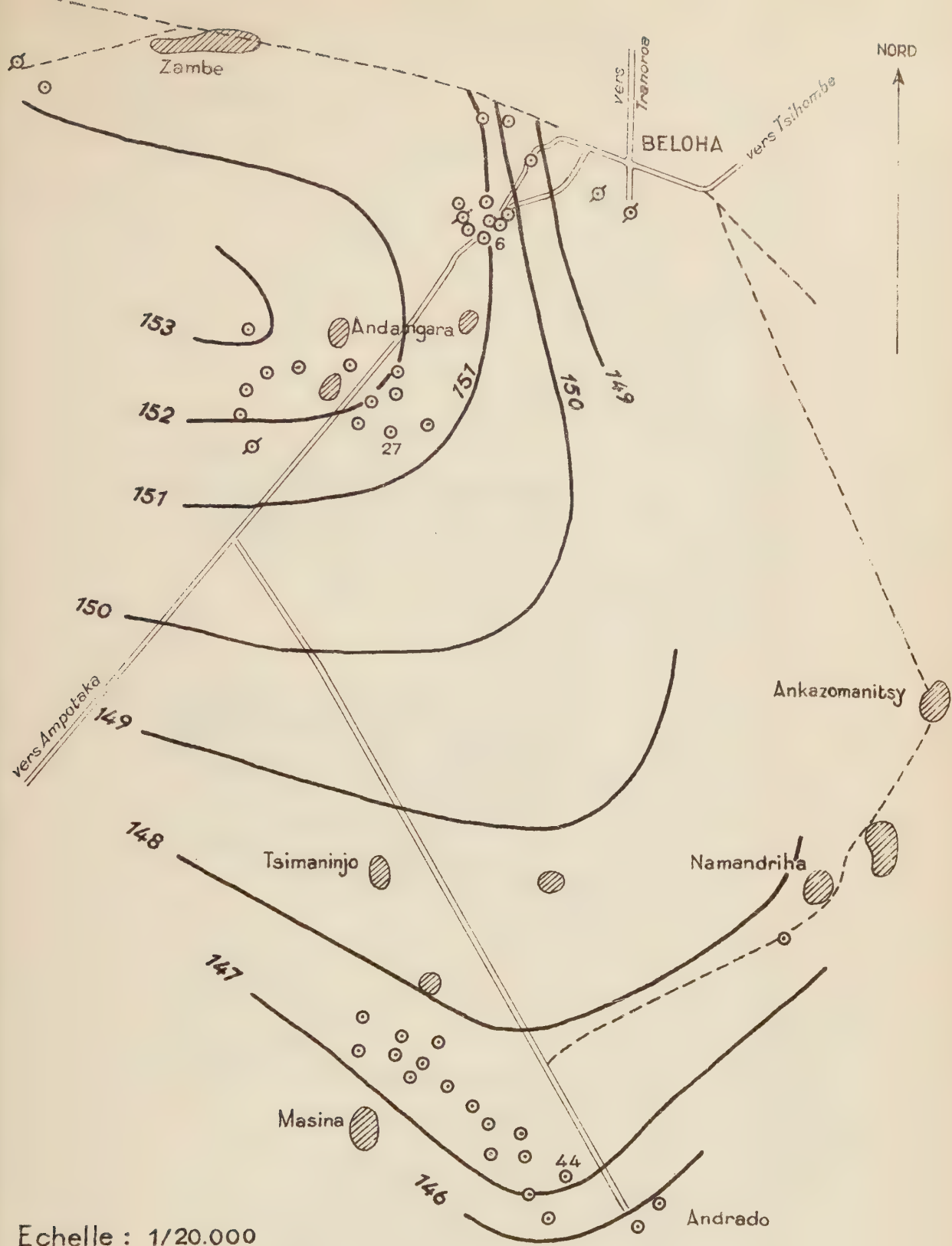




NAPPE D'ANKAZOMANGA

Echelle 1/100.000

- Limite des affleurements éocènes
- == Faille probable dans l'Eocène
- Puits cimenté
- ☺ Vovo permanent
- ☹ Vovo temporaire
- ☹ Mare temporaire
- 225 Courbes de niveau du sol
- 200 Courbes isopiézométriques de la nappe



Echelle : 1/20.000

NAPPE DE BELOHA

○ Puits

⊗ Puits à sec en Mai 1958

— Courbes isopiezométriques de la nappe

6.27.44 - Puits dont le débit a été étudié

XIV

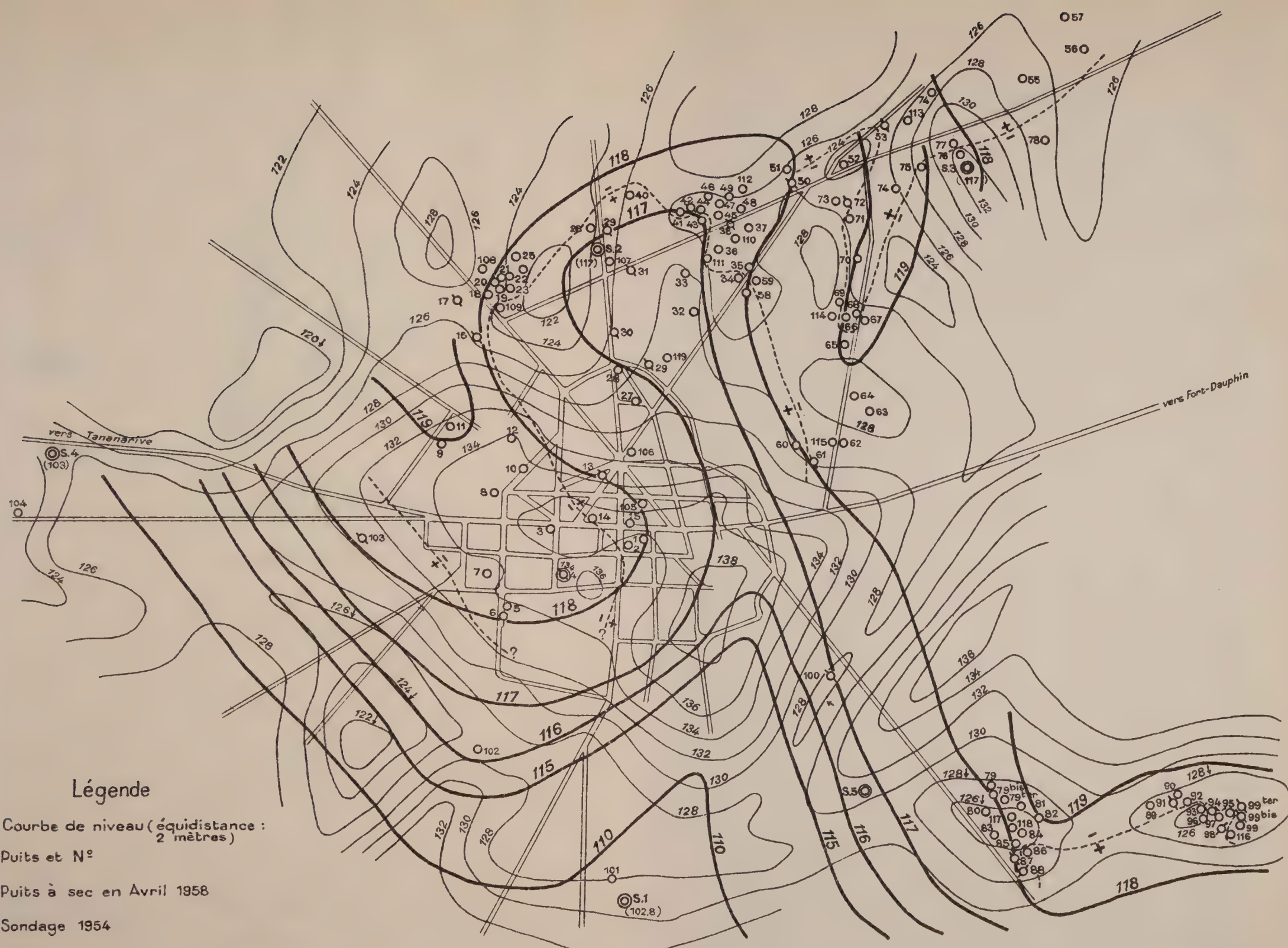
- Légende**
-  Courbe de niveau (équidistance : 2 mètres)
 -  Puits et N°
 -  Puits à sec en Avril 1958
 -  Sondage 1954
 - (103) Altitude du mur de la nappe
 -  Courbe isopiezométrique de la nappe en Avril 1958
 -  Limite des zones où l'eau a une dureté totale supérieure (+) ou inférieure (-) à 35°

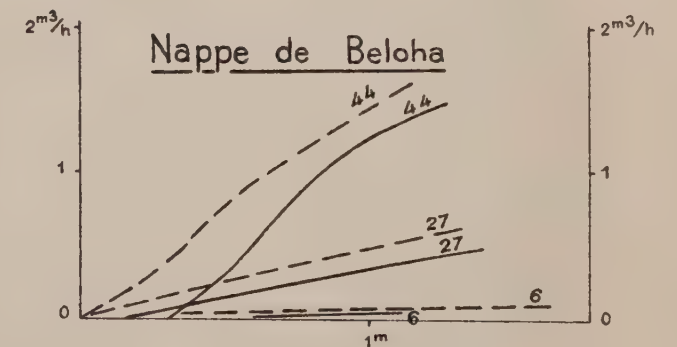
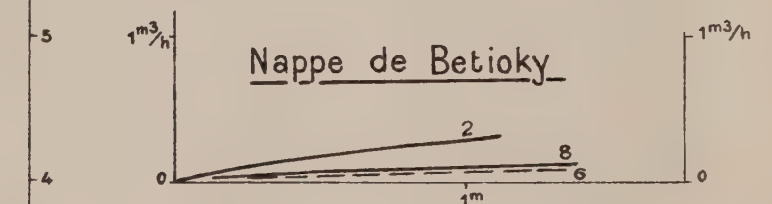
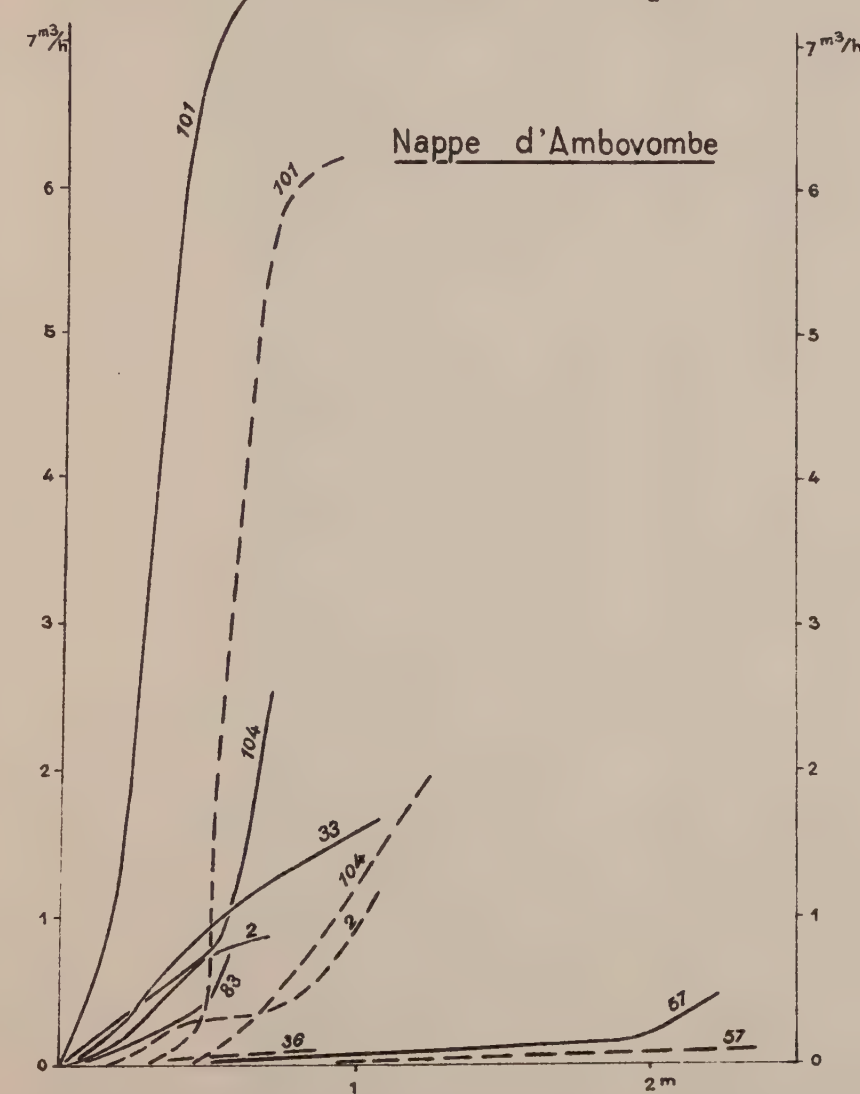
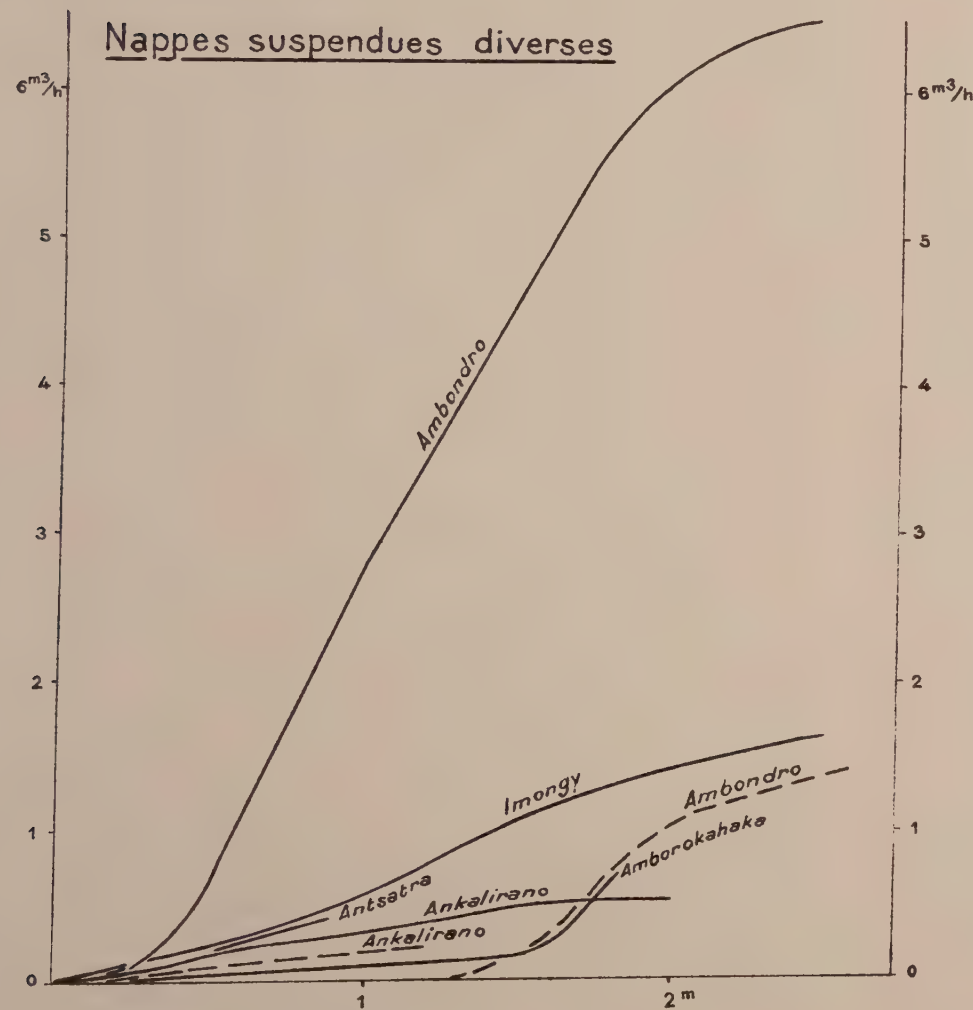
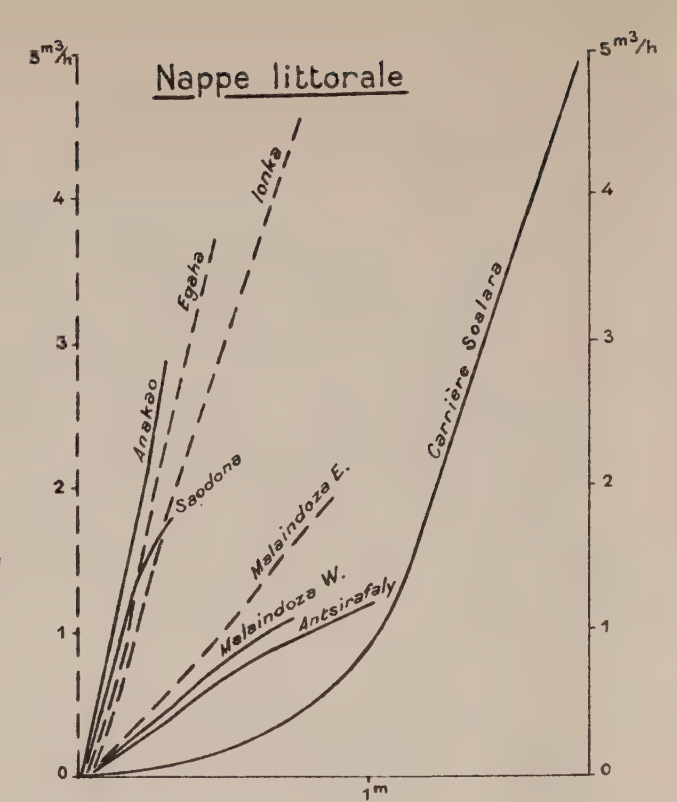
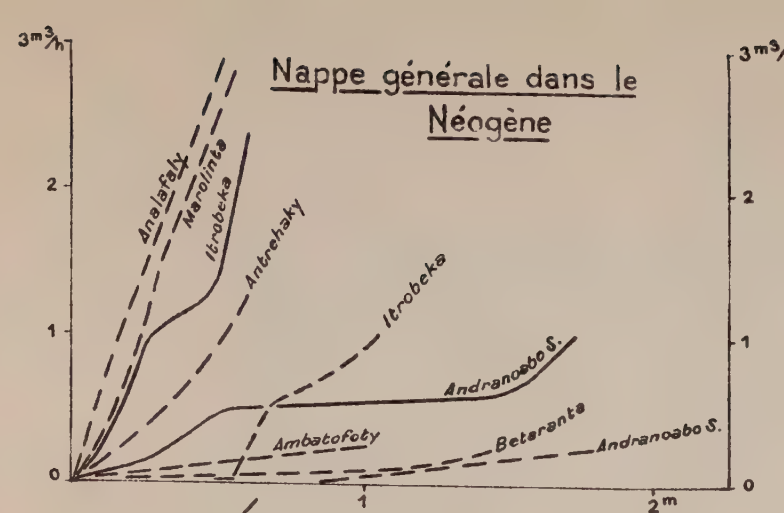
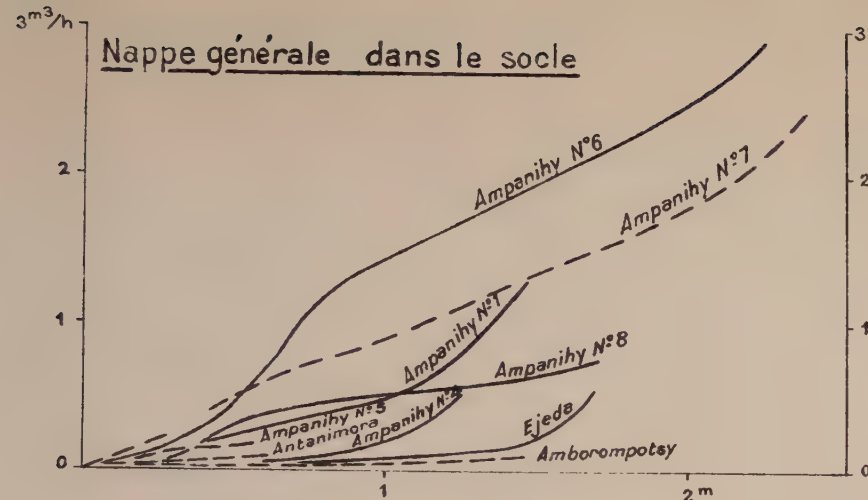
NAPPE D'AMBOVOMBE

Echelle

0 100 200 300 400 500 m

XVI





— Essais Juillet-Octobre 1957

- - - Essais Avril-Juillet 1958

En abscisses: Rabattements en mètres

En ordonnées: Débits correspondants en mètres cubes/heure

COURBES DES DEBITS EN FONCTION DES RABATTEMENTS



